

Accéléromètres piézoélectriques et préamplificateurs de vibration

Théorie et applications



Brüel & Kjær 

**ACCÉLÉROMÈTRES PIÉZOÉLECTRIQUES
ET
PRÉAMPLIFICATEURS DE VIBRATION**

par

Mark Serridge, BSc

et

Torben R. Licht, MSc

Novembre 1988

TABLE DES MATIÈRES

1. MESURES DE VIBRATIONS	1
1.1. INTRODUCTION	1
1.2. POURQUOI MESURER LES VIBRATIONS?	1
1.3. QU'EST-CE QU'UNE VIBRATION?	5
1.4. PARAMÈTRES DE VIBRATION	6
1.5. QUANTIFICATION DES NIVEAUX DE VIBRATION	7
Échelles linéaires de fréquence et d'amplitude	9
Échelles logarithmiques de fréquence et d'amplitude	9
1.6. ANALYSE DES MESURES DE VIBRATIONS	11
2. L'ACCÉLÉROMÈTRE PIÉZOÉLECTRIQUE	12
2.1. INTRODUCTION	12
2.2. FONCTIONNEMENT D'UN ACCÉLÉROMÈTRE	13
Traitement analytique du fonctionnement d'un accéléromètre	14
2.3. GAMME FRÉQUENTIELLE	18
Limite haute fréquence	19
Limite basse fréquence	20
2.4. MATÉRIAUX PIÉZOÉLECTRIQUES	20
2.5. CONCEPTIONS D'ACCÉLÉROMÈTRES	23
Accéléromètres Line-Drive	25
Autres conceptions	25
2.6. SENSIBILITÉ DE L'ACCÉLÉROMÈTRE	26
Sensibilités en charge et en tension	26
Sensibilité Uni-Gain®	28
Linéarité et gamme dynamique	28
Sensibilité transversale	29
2.7. RÉPONSE EN PHASE	32
2.8. RÉPONSE AUX TRANSITOIRES	33
Effets de fulte	34
«Ringig»	36
Déviation du zéro	37

3. PRÉAMPLIFICATEURS DE VIBRATIONS	39
3.1. CONCEPTION ET FONCTIONNEMENT	40
3.2. PRÉAMPLIFICATEURS DE CHARGE	40
Sensibilité en charge	41
Limite basse fréquence	45
Charge capacitive d'entrée due aux câbles d'accéléromètres	49
Atténuation de la charge	51
Bruit dans les préamplificateurs de charge	51
3.3. PRÉAMPLIFICATEURS DE TENSION	56
Sensibilité en tension	56
Limite basse fréquence	58
Bruit lié aux préamplificateurs de tension	59
3.4. CÂBLES DE SORTIE DU PRÉAMPLIFICATEUR	59
3.5. SYSTÈMES LINE-DRIVE	60
Accéléromètres et sources Line-Drive de Brüel & Kjær	63
Amplificateurs et sources Line-Drive de Brüel & Kjær	63
3.6. COMPARAISON DES SENSIBILITÉS DE DIVERS SYSTÈMES AUX SOURCES DE VIBRATION EXTERNES	63
Accéléromètre et préamplificateur de charge reliés à la masse ...	66
Accéléromètre relié à la masse avec amplificateur de charge (entrée «flottante»)	67
Amplificateur et source d'alimentation Line-Drive Brüel & Kjær (entrée rapportée à la masse)	68
Amplificateur/source d'alimentation Line-Drive Brüel & Kjær (entrée «flottante»)	69
Système Line-Drive et source de courant constant	71
Accéléromètre à sortie bipolaire et amplificateur de charge différentiel	72
Influence sur le bruit du montage isolé d'un accéléromètre	73
3.7. OPTIONS SPÉCIALES POUR PRÉAMPLIFICATEURS	74
Réseaux d'intégration	74
Filtres	78
Indicateur de surcharge	80
Oscillateur de référence	80
Sources d'alimentation	81
4. PERFORMANCES RÉELLES DES ACCÉLÉROMÈTRES	82
4.1. INTRODUCTION	82
4.2. EFFETS DUS À L'ENVIRONNEMENT	83
Gamme thermique	83
Transitoires thermiques	85
Sensibilité acoustique	87
Contraintes de base	88

Humidité	88
Sensibilité magnétique	89
Radiations	89
4.3. INFLUENCE DE LA MASSE D'UN ACCÉLÉROMÈTRE	89
4.4. MONTAGE DE L'ACCÉLÉROMÈTRE	91
Spécifications de finition de la surface de test	92
Emplacement du montage	92
Détermination de la réponse fréquentielle des accéléromètres avec diverses techniques de montage	93
Montage avec goujon	93
Montage à la cire	96
Montage sur aimant	98
Rondelles de montage autocollantes	100
Adhésifs	102
Sondes	105
4.5. FILTRES MÉCANIQUES	108
Description	108
Fonctionnement	109
4.6. CÂBLES D'ACCÉLÉROMÈTRES	110
4.7. PRÉCAUTIONS POUR MISE À LA MASSE	112
5. ÉTALONNAGE ET ESSAIS D'ACCÉLÉROMÈTRES	114
5.1. INTRODUCTION	114
Pourquoi étalonner un accéléromètre?	116
5.2. HIÉRARCHIE DES NORMES D'ÉTALONNAGE	117
Hiérarchie générale	117
Hiérarchie chez Brüel & Kjær	118
Précision des techniques d'étalonnage	121
5.3. MÉTHODES D'ÉTALONNAGE	122
Interférométrie laser	122
Autres méthodes absolues	124
Étalonnage comparatif par méthode «dos-à-dos»	124
Étalonnage dos-à-dos reposant sur l'analyse FFT	126
Emploi d'excitateurs de vibrations étalonnés pour le contrôle de sensibilité	127
5.4. AUTRES PARAMÈTRES PROPRES À L'ACCÉLÉROMÈTRE	128
Sensibilité transversale	128
Réponse fréquentielle	129
Fréquence naturelle non amortie	131
Capacité	132
5.5. DÉTERMINATION DES EFFETS ENVIRONNEMENTAUX SUR LES SPÉCIFICATIONS DE L'ACCÉLÉROMÈTRE	133
Sensibilité aux transitoires thermiques	133
Sensibilité thermique	133

Sensibilité aux contraintes de base	134
Sensibilité acoustique	134
Sensibilité magnétique	135
Limites thermiques	135
Limites de choc	135
5.6. CONTRÔLE EN USINE DES CÂBLES D'ACCÉLÉROMÈTRES	136
5.7. ÉQUIPEMENT D'ÉTALONNAGE	137
Système d'étalonnage Type 9559	137
Équipement d'étalonnage individuel	138
5.8. NORMES RELATIVES À L'ÉTALONNAGE D'ACCÉLÉROMÈTRES	139
6. APPENDICES	141
APPENDICE A. Tables de conversion	142
APPENDICE B. Nomogramme de vibrations	145
APPENDICE C. Normes de vibrations	146
APPENDICE D. Littérature Brüel & Kjær sur les vibrations	146
APPENDICE E. Liste des préamplificateurs Brüel & Kjær	148
APPENDICE F. Liste des instruments Brüel & Kjær dotés de préamplificateurs incorporés	150
APPENDICE G. Diagramme des gammes fréquentielle et dynamique des accéléromètres Brüel & Kjær	152
APPENDICE H. Liste des accéléromètres Brüel & Kjær	154

SYMBOLES

Grandeurs générales

- t = Temps
 f = Fréquence
 ω = Pulsation
 j = $\sqrt{-1}$
 e = Base du logarithme naturel

Dynamique générale

- x = Déplacement
 v = Vitesse
 a = Accélération
 F = Force
 T = Période
 τ = Constante de temps

Dynamique d'accéléromètre

- m_s = Masse sismique
 m_b = Masse de la base
 x_s = Déplacement de la masse sismique
 x_b = Déplacement de la base
 F_o = Force d'excitation
 ω_n = Fréquence de résonance naturelle (rads/sec)
 ω_m = Fréquence de résonance monté (rads/sec)
 f_m = Fréquence de résonance monté (Hz)
 A = Facteur d'amplification
 Z_s = Impédance mécanique de la structure
 Z_a = Impédance mécanique de l'accéléromètre

Grandeurs électriques générales

- I < = Intensité du courant
 V = Tension
 Q = Charge
 C = Capacité
 R = Résistance
 Z = Impédance

SYMBOLES

Grandeurs électriques de l'accéléromètre

V_a	= Tension à vide
Q_a	= Charge générée par les éléments piézoélectriques
C_a	= Capacité de l'accéléromètre
R_a	= Résistance de l'accéléromètre
S_{qa}	= Sensibilité en charge de l'accéléromètre
S_{va}	= Sensibilité en tension de l'accéléromètre (chargé)
$S_{va (b. ouverte)}$	= Sens. en tension de l'accéléromètre (boucle ouverte)
$C_{boit.}$	= Capacité entre les bornes de sortie du boîtier d'un accéléromètre

Grandeurs électriques du câble

C_c	= Capacité du câble
R_c	= Résistance du câble
R_g	= Résistance entre le conducteur central et le blindage
C_s	= Capacité entre le blindage et les conducteurs internes dans un câble d'accéléromètre à sortie bipolaire
C_d	= Capacité du diélectrique dans un câble d'accéléromètre à sortie bipolaire
q_b	= Bruit tribo-électrique

Grandeurs électriques du préamplificateur

R_p	= Résistance d'entrée du préamplificateur
C_p	= Capacité d'entrée du préamplificateur

C_{cr}	= Capacité de contre-réaction
R_{cr}	= Résistance de contre-réaction
A	= Gain de l'amplificateur opérationnel
V_e	= Tension d'entrée du préamplificateur
V_s	= Tension de sortie du préamplificateur
Z_{cr}	= Impédance de contre-réaction
Z_t	= Impédance totale (accéléromètre, câble et préamplificateur)
I_i	= Intensité du courant venant de C_t
I_c	= Intensité du courant à travers le condensateur de contre-réaction
V_c	= Tension aux bornes du condensateur de contre-réaction
C_t	= Capacité totale (accéléromètre, câble et préamplificateur)
R_t	= Résistance totale (accéléromètre, câble et préamplificateur)
$R_{flot.}$	= Résistance de l'étage «flottant» du préamplificateur
$RRMC$	= Rapport de réjection en mode commun de l'amplificateur opérationnel «flottant»
e_b	= Tension liée au bruit
i_b	= Intensité du courant lié au bruit
R_s	= Résistance de sortie de l'amplificateur Line-Drive

1. MESURE DE VIBRATIONS

1.1. INTRODUCTION

Les années récentes ont vu la multiplication des problèmes de vibrations associés à des structures plus délicates et à des machines plus rapides et plus complexes. Ces problèmes sont liés aux exigences du marché pour un meilleur rapport qualité/prix. Une attention particulière est aussi portée sur les effets du bruit et des vibrations sur les hommes, et sur la durée de vie des produits manufacturés. Il s'impose donc une meilleure compréhension des causes de vibrations et des réponses dynamiques des structures aux forces vibratoires. À cet effet, un capteur de vibrations précis, fiable et versatile est requis. De plus, les appareils de mesure et d'analyse très sophistiqués qui sont souvent utilisés sont inutiles sans signaux de vibrations précis venant d'un capteur fiable.

L'accéléromètre piézoélectrique est actuellement le meilleur capteur de vibrations. Les innombrables instruments de mesure haut de gamme maintenant disponibles peuvent utiliser pleinement les très larges gammes fréquentielles et dynamiques offertes par ce type de capteur de vibrations.

Ce manuel est avant tout un guide pratique pour des mesures de vibrations précises avec les accéléromètres piézoélectriques fabriqués par Brüel & Kjær.

1.2. POURQUOI MESURER LES VIBRATIONS?

Les vibrations sont mesurées à des fins très diverses. En général, toute vibration non contrôlée est un phénomène indésirable qui augmente le facteur bruit, cause des défaillances mécaniques et peut être à l'origine de l'affaissement d'une structure. Quatre grands domaines de mesure de vibrations peuvent être définis:

1. **Test de vibration.** En tant que partie intégrante d'un programme de tests d'environnement, ou d'ingénierie de conception, le test de vibration joue un rôle vital dans la détermination de la résistance d'un composant aux environnements vibratoires qu'il est susceptible de rencontrer dans des situations réelles.

Lors d'un test de vibrations, une structure (par ex. un élément d'avion) est soumise à de hauts niveaux de vibrations avec un excitateur vibratoire. Le niveau de vibrations est maintenu constant dans des gammes de fréquence définies, et la fréquence est balayée. Ceci est accompli à l'aide d'un contrôleur d'excitateur vibratoire et d'un accéléromètre de contre-réaction. Les informations sur la réponse fréquentielle sont obtenues avec un second accéléromètre monté sur la structure.

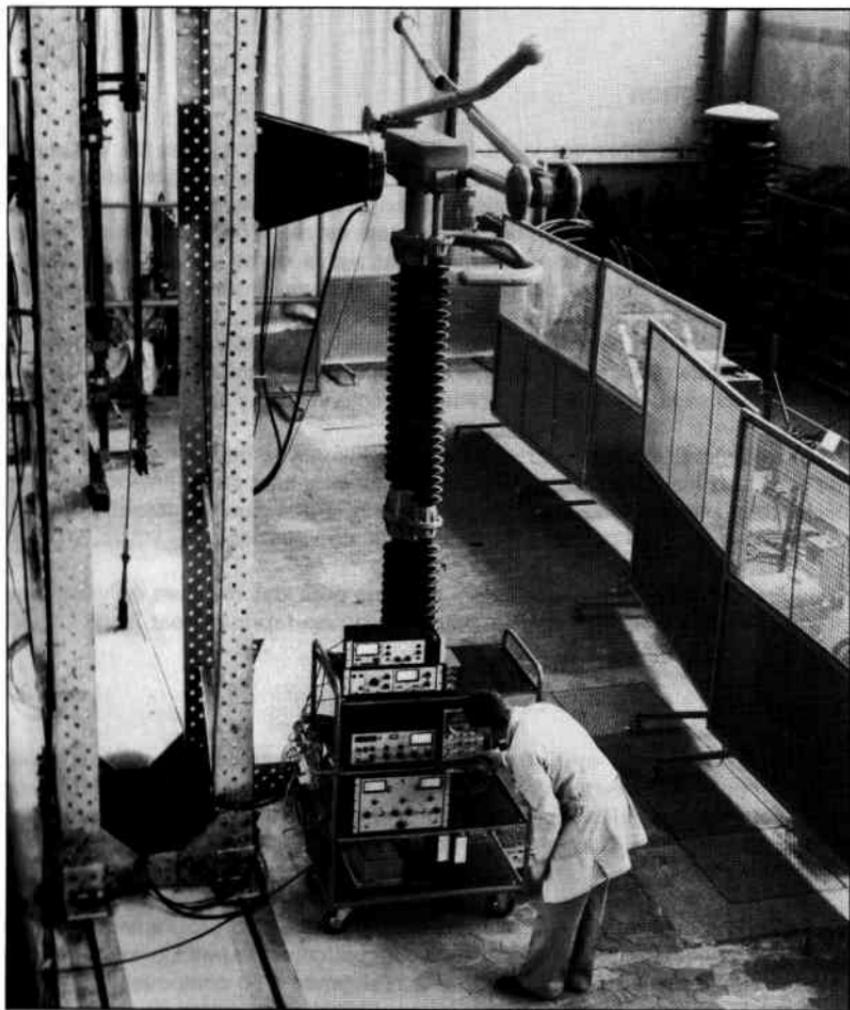


Fig. 1.1. Test de vibration sur un isolateur de pylône de haute tension

- 2. Surveillance de l'état des machines et diagnostic des défauts.** Dans sa forme la plus simple, une mesure de niveau global de vibration d'une machine est utilisée afin de signaler tout problème imminent. Cependant, de plus amples informations peuvent être obtenues par l'analyse fréquentielle. Cette technique 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 du spectre. De tels changements sont les signes précurseurs de l'imminence évidente d'un problème et permettent le diagnostic de défauts.

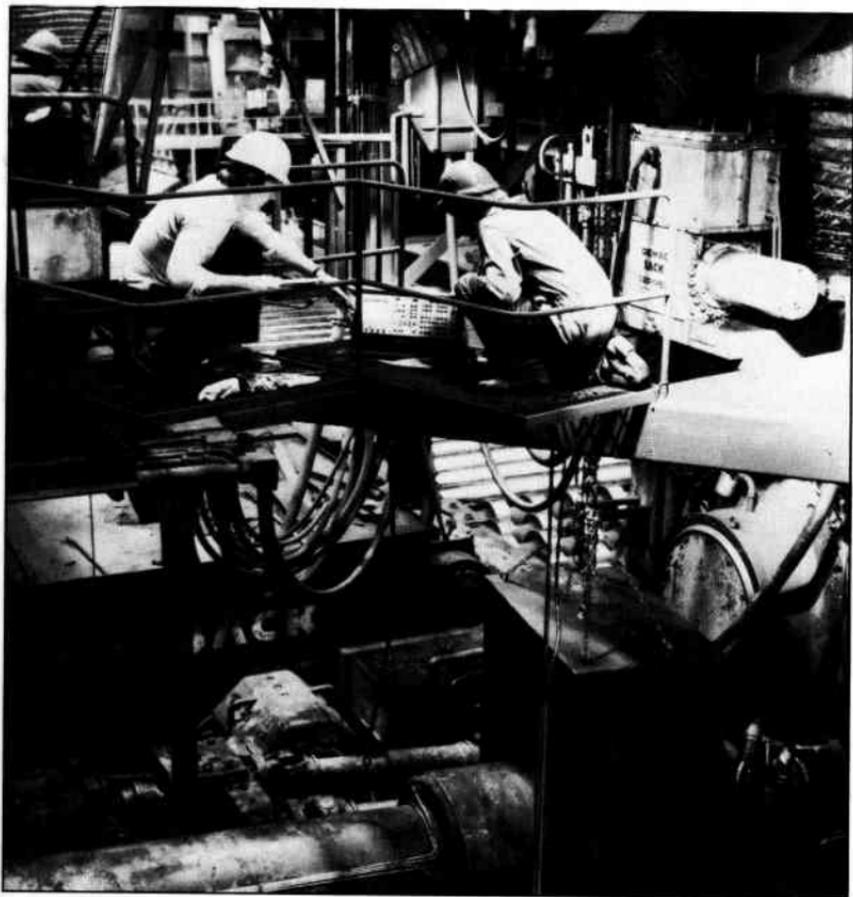


Fig. 1.2. Les mesures de vibration sont utilisées dans les programmes de surveillance de machines et de diagnostic de défauts

En pratique, la mesure de vibrations contribue à l'équilibrage des arbres de machines tournantes. Le déséquilibre cause de hauts niveaux de vibrations qui conduisent souvent à l'usure rapide et à la détérioration des paliers.

3. **Analyse structurelle.** Il s'agit d'une méthode expérimentale efficace se basant sur les mesures de vibrations pour déterminer le comportement dynamique d'une structure, variant en envergure des petites ailettes 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. Le calcul à grande vitesse accompli par l'analyseur, utilisé conjointement avec un ordinateur de bureau, fournit les informations essentielles pour la vérification et la modification de la structure.



Fig. 1.3. Analyse structurelle d'un wagon de train à partir de mesures de vibrations

- 4. Mesure de vibrations appliquées à l'homme.** Ce domaine concerne la mesure des vibrations transmises à l'homme. Ces vibrations peuvent, par exemple, parvenir de véhicules ou d'outils électriques tenus à la main. Les niveaux de vibrations mesurés sont ainsi modifiés pour satisfaire au confort humain et aux critères de santé stipulés dans les normes internationales.



Fig. 1.4. Mesure des niveaux de vibration transmis par le manche d'une scie électrique en utilisant un accéléromètre et un mesureur de vibration

1.3. QU'EST-CE QU'UNE VIBRATION?

Une vibration est un phénomène dynamique observé comme un mouvement de va-et-vient par rapport à une position d'équilibre. Elle est causée par le transfert ou l'emmagasinement d'énergie au sein des structures, résultant de l'action d'une ou de plusieurs forces. Les vibrations sont souvent le sous-produit d'une opération utile et sont donc très difficiles à éviter.

Ces vibrations peuvent être observées dans le *domaine temporel*, à travers la variation en amplitude de la vibration avec le temps («historique temporel»). L'historique temporel d'une vibration se rapporte à l'une des nombreuses classes définies par leur forme mathématique ou par les propriétés statistiques des mouvements qu'elles contiennent. Les vibrations peuvent aussi être observées dans le *domaine fréquentiel* où elles sont décrites par leur spectre fréquentiel. Les deux domaines sont reliés mathématiquement par la *Transformée de Fourier*.

Contrairement aux autres capteurs de vibration, les accéléromètres piézoélectriques sont conçus pour mesurer *tout* type de vibration, peu importe sa nature dans le domaine temporel ou fréquentiel, *pourvu que l'accéléromètre soit dans les bonnes gammes dynamique et fréquentielle*. Grâce à la largeur de celles-ci, il est toujours possible de trouver un accéléromètre approprié pour toute mesure de vibration. Seules les techniques d'analyse sont sujettes à des changements, suivant le type de vibration.

1.4. PARAMÈTRES DE VIBRATION

L'accéléromètre piézoélectrique mesure l'accélération et ce signal est intégré électroniquement une première fois pour fournir le signal de vitesse. Une deuxième intégration procure le signal de déplacement.

La Fig. 1.5 montre l'effet de l'intégration de l'accélération d'une perceuse électrique. La vibration est affichée dans le domaine fréquentiel. L'intégrateur se conduit comme un filtre passe-bas et atténue les grandes composantes fréquentielles présentes avant l'intégration. L'utilisation d'un réseau d'intégration élimine certaines informations sur la vibration. Bien sûr, ceci n'est tolérable que si les informations perdues ne sont pas essentielles au but de la mesure.

L'accélération devrait toujours être utilisée lorsque l'intégration ne s'impose pas. D'autre part, il est souvent désirable de minimiser la gamme dynamique des instruments présents dans un dispositif de mesure de vibration pour améliorer le rapport signal/bruit de la mesure. Ceci est accompli en employant le paramètre donnant le spectre fréquentiel le plus plat possible (voir Fig. 1.5(b)). Seule l'analyse de fréquence peut révéler la composition fréquentielle d'un signal vibratoire. Pour les mesures en bande large sur les machines tournantes, la vitesse est le meilleur paramètre dans 70% des cas, et l'accélération dans 30% des cas. Le paramètre déplacement n'est guère utilisé sauf pour les mesures en basse fréquence, ainsi que les mesures de grands déplacements vibratoires tels que ceux rencontrés sur les grandes structures (navires, bâtiments et ponts).

Lorsque des signaux complexes tels que les chocs et les impulsions sont mesurés, les réseaux d'intégration *ne doivent pas* être utilisés car ils engen-

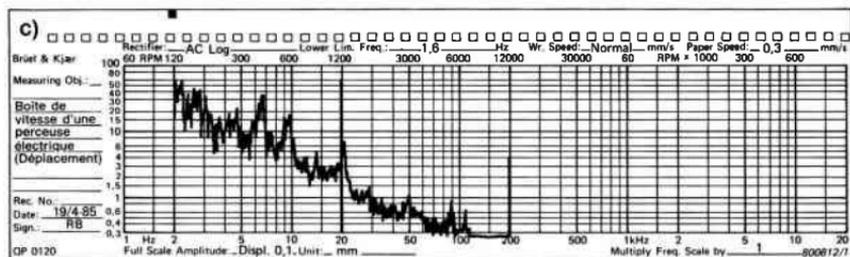
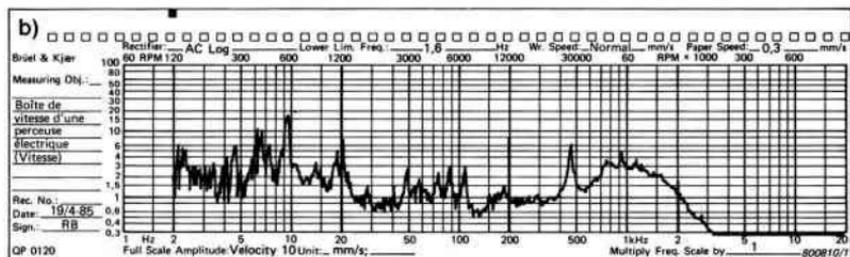
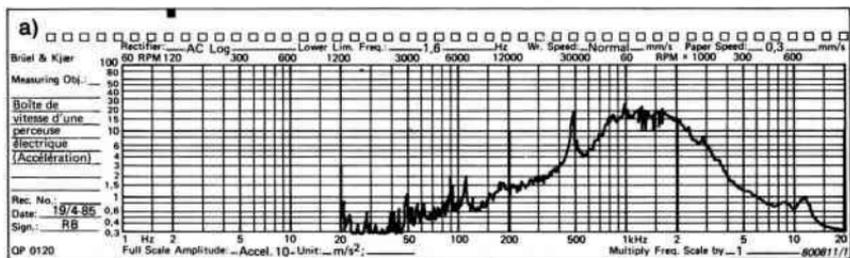


Fig. 1.5. Analyse fréquentielle des vibrations d'une perceuse électrique en utilisant trois paramètres de mesure différents (accélération, vitesse ou déplacement)

drent des erreurs de phase donnant elles-mêmes naissance à de sérieuses erreurs de mesure d'amplitude.

1.5. QUANTIFICATION DES NIVEAUX DE VIBRATION

Il existe plusieurs façons de quantifier l'amplitude vibratoire d'un signal dans le domaine temporel. Les unités de mesure (par ex. m/s^2 , g etc) peuvent différer bien que les paramètres décrits dans ce paragraphe sont très utilisés.

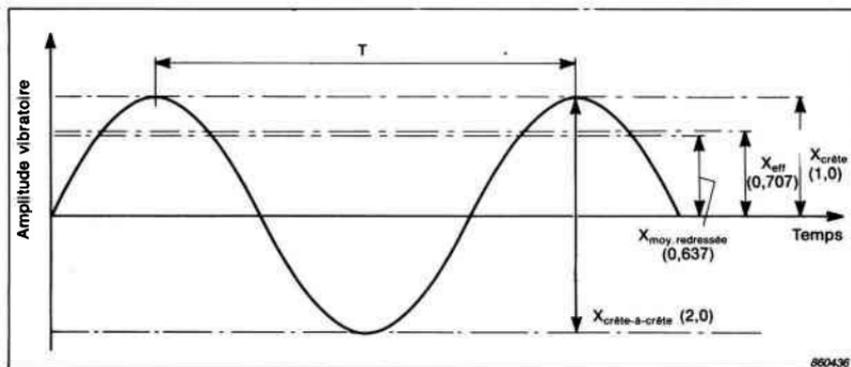


Fig. 1.6. Simple harmonique d'une vibration. L'amplitude mentionnée peut être le déplacement, la vitesse ou l'accélération

La Fig. 1.6 montre la forme la plus simple de l'historique temporel d'une vibration. Il est représenté par une particule oscillant par rapport à une position de référence où des conditions de mouvement exactement identiques sont rencontrées à des intervalles de temps fixes. Ceux-ci sont appelés périodes, T , de la vibration. L'amplitude vibratoire varie sinusoidalement en fonction du temps.

Lorsque les amplitudes de déplacement, de vitesse ou d'accélération sont choisies pour représenter le mouvement, les formes et les périodes de la vibration sont identiques. Seules les phases relatives sont différentes.

L'amplitude du signal vibratoire illustré Fig. 1.6 peut être décrite en utilisant les paramètres suivants.

1. **Niveau efficace:** donne la description la plus utile des niveaux de vibration. La racine carrée de l'intégrale du carré de la fonction est liée à l'énergie vibratoire et donc au «potentiel de détérioration» de la vibration. La valeur efficace d'une onde sinusoidale est $1/\sqrt{2}$ fois la valeur du niveau de crête.
2. **Niveau de crête:** donne le niveau maximum et s'avère utile dans les mesures concernant les chocs de petite durée. Cependant, il ne tient pas compte de l'historique temporel de la vibration.
3. **Crête-à-crête:** différence entre les niveaux maximum et minimum. Bien qu'employé dans la description des déplacements vibratoires, ce paramètre est tout de même rarement utilisé.
4. **Niveau moyen:** prend l'historique temporel de la vibration en considération

mais il n'y a aucune relation utile entre le niveau moyen et toute grandeur physique. Dans la Fig. 1.6, on mentionne la valeur moyenne de l'onde sinusoïdale *redressée*.

5. **Facteur de crête:** définit le rapport de la valeur de crête d'un signal à sa valeur efficace. D'après la définition du niveau efficace, le facteur de crête pour l'onde sinusoïdale Fig 1.6 est de $\sqrt{2}$. Plus la vibration devient impulsive, plus le niveau de crête augmente. Cette relation est facilement calculée avec un mesureur de vibration pouvant lire les valeurs de crête et les valeurs efficaces. Lorsque des mesures de bande large sont prises sur un palier de machine, l'augmentation au niveau d'une seule composante de la vibration, causée par un palier défaillant, ne peut pas être détectée par les mesures efficaces, mais peut être indiquée dans l'augmentation du facteur de crête. Ainsi, en surveillant les augmentations du facteur de crête, il est possible de prévoir une panne ou la défaillance d'un élément.

Un autre exemple de l'utilité des facteurs de crête peut être trouvé dans les techniques de test de structure. Le facteur de crête du signal d'entrée à la structure peut révéler des informations importantes quant à l'excitation. Si le facteur de crête est très important, comme c'est le cas avec un impact de marteau, la structure peut être conduite vers un comportement dynamique non-linéaire. Un grand facteur de crête peut aussi indiquer que le signal d'entrée ne contient pas l'énergie suffisante pour l'obtention d'un bon rapport signal/bruit. D'autre part, un grand facteur de crête implique une grande gamme fréquentielle du signal d'entrée.

1.5.1. Échelles linéaires de fréquence et d'amplitude

Les échelles linéaires de fréquence et d'amplitude sont utilisées dans les mesures de vibration lorsqu'une haute résolution est requise. Elles permettent de séparer les composantes fréquentielles trop proches l'une de l'autre. En plus, elles permettent de distinguer facilement les composantes d'harmoniques équidistants entre eux.

1.5.2. Échelles logarithmiques de fréquence et d'amplitude

Les accéléromètres piézoélectriques permettent de faire des mesures précises sur de très larges gammes dynamiques et fréquentielles. Ainsi, pour une meilleure interprétation des résultats, les échelles suivantes sont souvent requises:

1. Une échelle d'amplitude pouvant contenir des valeurs allant des plus basses amplitudes vibratoires jusqu'aux niveaux de choc et pouvant également faciliter la comparaison des niveaux de vibration.

2. Une échelle fréquentielle ayant, en pourcentage, la même résolution sur toute la largeur du papier d'enregistrement.

Ces deux conditions peuvent être réunies en utilisant:

1. **Une échelle en décibels.** Bien que communément associé aux mesures acoustiques, le décibel (dB) est également utilisé dans les mesures de vibration. C'est le rapport d'une amplitude à une autre et il s'exprime sous forme logarithmique. Pour les rapports d'amplitudes vibratoires, la relation suivante existe:

$$\begin{aligned} N \text{ (dB)} &= 10 \log_{10} \left(\frac{a^2}{a_{\text{réf}}^2} \right) \\ &= 20 \log_{10} \left(\frac{a}{a_{\text{réf}}} \right) \end{aligned}$$

où

- N = nombre de décibels
 a = amplitude vibratoire mesurée
 $a_{\text{réf}}$ = amplitude de référence

D'après la norme ISO 1683 les amplitudes de référence sont:

Accélération = 10^{-6} ms^{-2}

Vitesse = 10^{-9} ms^{-1}

Déplacement = 10^{-12} m

Pour une onde sinusoïdale de pulsation $\omega = 1000$ radians par seconde (soit environ 159 Hz) ces amplitudes sont numériquement équivalentes. Ces amplitudes de référence doivent être mentionnées lorsque les niveaux vibratoires absolus sont indiqués en dB (par ex. «la mesure de l'amplitude vibratoire fut de 110 dB réf. 10^{-6} ms^{-2} »). Cependant, lorsque des amplitudes vibratoires sont comparées, la différence en dB peut être utilisée à condition qu'ils soient référés à la même référence. Par exemple, il est permis de dire qu'un niveau est 20 dB au-dessus d'un autre sans pour autant mentionner de référence.

2. **Une échelle de fréquence logarithmique.** La fréquence est parfois représentée à l'aide d'une échelle logarithmique. L'utilisation de cette échelle a pour effet d'élargir les gammes de basse fréquence et de comprimer les gammes de haute fréquence. Il en résulte une échelle de proportions raisonnables et une résolution relativement unie sur l'axe fréquentiel (sur écran de visualisation ou sur papier d'enregistrement). Ainsi, une échelle de fréquence logarithmique est utilisée pour couvrir de larges gammes fréquentielles.

1.6. ANALYSE DES MESURES DE VIBRATION

La quantité d'informations pouvant être obtenue à partir d'une analyse traditionnelle du domaine temporel est limitée, bien que les techniques modernes d'analyse du domaine temporel se soient améliorées. Cependant, avec l'apport d'un équipement d'analyse fréquentielle, comme un analyseur de fréquence analogique et digital, des informations supplémentaires très utiles sont obtenues. Ce manuel ne couvre pas de tels instruments. Par contre, on conseille la consultation des ouvrages de Brüel & Kjær «Mechanical vibration and shock measurements» et «Frequency analysis» pour de solides bases théoriques en analyse fréquentielle, ainsi que les catalogues pour des détails sur la gamme d'instruments disponibles chez Brüel & Kjær.

La complexité des instruments de mesure et l'analyse des résultats peuvent beaucoup varier. Mais dans tous les cas, le capteur de vibration est le maillon le plus important de la chaîne de mesure, car sans signaux de vibration précis, les résultats d'analyse ne sont pas fiables.

Le capteur de vibration le plus précis, le plus versatile et le plus fiable n'est autre que l'accéléromètre piézoélectrique.

2. L'ACCÉLÉROMÈTRE PIÉZOÉLECTRIQUE

2.1. INTRODUCTION

Le but de ce chapitre est d'inculquer au lecteur un aperçu théorique de base sur le fonctionnement et les caractéristiques d'un accéléromètre piézoélectrique. À cause de la nature de son fonctionnement, le rôle que joue le préamplificateur de vibrations devra être brièvement inclus. Cependant, pour une description complète du fonctionnement et des caractéristiques des préamplificateurs, on devrait consulter le Chapitre 3 «Préamplificateurs de vibration». Une liste complète des accéléromètres Brüel & Kjær se trouve dans l'Appendice H.

L'accéléromètre piézoélectrique est unanimement considéré comme le meilleur capteur disponible pour les mesures de vibrations absolues. C'est là le résultat direct des propriétés suivantes:

1. Utilisable sur de très larges gammes fréquentielles.
2. Excellente linéarité sur une très grande gamme dynamique.
3. Le signal d'accélération peut être intégré électroniquement pour donner le déplacement et la vitesse.
4. Les mesures de vibration peuvent être faites sous un large éventail de conditions environnementales tout en conservant une excellente précision.
5. Étant lui-même générateur de charges, il est donc indépendant de toute source d'alimentation externe.
6. Aucun élément mobile, donc extrêmement durable.
7. Extrêmement compact et d'un grand rapport sensibilité/masse.

Afin de mieux apprécier ces avantages, examinons les caractéristiques d'autres types de capteurs de vibrations et d'instruments mesureurs de vibrations.

1. **Sonde de proximité.** Un instrument ne mesurant que les déplacements vibratoires relatifs. Elle a une réponse aux déplacements quasi-statiques ainsi qu'une faible impédance de sortie. Cependant, cette sonde ne génère pas de charges et ses possibilités en hautes fréquences sont donc limitées. De plus, la surface vibrante doit être électriquement conductrice.

2. **Sonde capacitive.** Petit, libre de tout contact, ce capteur de déplacement vibratoire 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.
3. **Potentiomètre de position.** Peu coûteux et de faible impédance, cet instrument est capable de mesurer les déplacements statiques. Cependant, les gammes dynamique et fréquentielle sont limitées et l'instrument n'a qu'une courte durée de vie et une faible résolution.
4. **Capteur piézorésistif.** Un capteur d'accélération vibratoire capable de mesurer les accélérations quasi-statiques. Les gammes de mesure, fréquentielle et dynamique, peuvent être larges. Ses possibilités limitées contre les chocs impliquent que ce type de capteur est facilement vulnérable. On a souvent recours à l'amortissement visqueux pour le protéger des chocs. Cependant, ceci mène à une compression de la gamme thermique de fonctionnement et altère les caractéristiques de phase.
5. **Bobine mobile.** Un capteur de vitesse vibratoire de faible impédance électrique, et très limité dans ses gammes dynamique et fréquentielle. Sensible aux champs magnétiques et affecté par son orientation.

2.2. FONCTIONNEMENT D'UN ACCÉLÉROMÈTRE

La Fig. 2.1 illustre un modèle simplifié de l'accéléromètre à Cisaillement en delta[®] de Brüel & Kjær, montrant seulement les parties mécaniques. Les élé-

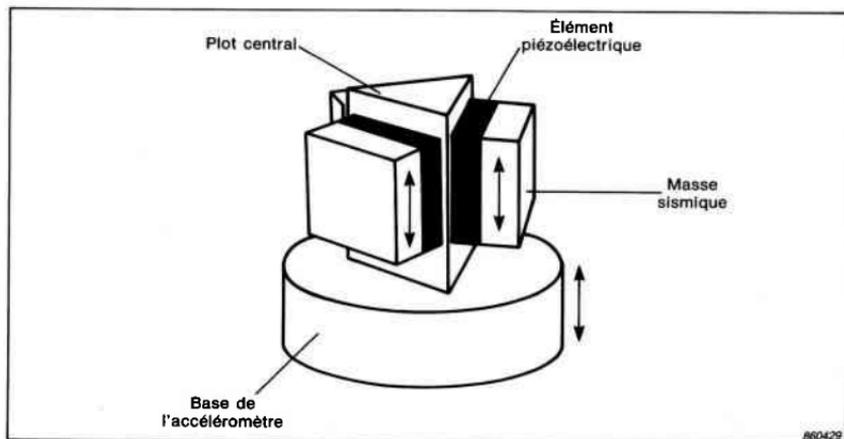


Fig. 2.1. Schéma d'un accéléromètre à Cisaillement en delta[®] de Brüel & Kjær

ments actifs de l'accéléromètre sont les éléments piézoélectriques. Ceux-ci agissent comme des ressorts reliant, à travers le plot central, la base de l'accéléromètre aux masses sismiques. Lorsque l'accéléromètre subit des vibrations, une force égale au produit d'une masse sismique par sa propre accélération agit sur chaque élément piézoélectrique. Ceux-ci produisent une charge proportionnelle à la force appliquée. Les masses sismiques étant constantes, la charge produite par les éléments est également proportionnelle à l'accélération des masses sismiques. Avec une accélération de celles-ci avec les mêmes amplitudes et phases que la base de l'accéléromètre sur une large gamme fréquentielle, la sortie de l'accéléromètre est proportionnelle à l'accélération de la base et donc à celle de la surface sur laquelle il est monté.

Le modèle précédent peut être simplifié (voir Fig. 2.2).

2.2.1. Traitement analytique du fonctionnement d'un accéléromètre

La Fig. 2.2 montre un modèle simplifié de l'accéléromètre décrit dans le paragraphe précédent et réduit à un système inertiel. Les deux masses n'ont pas de supports et sont reliées par un ressort idéal. L'amortissement est négligé dans ce modèle car les accéléromètres Brüel & Kjær ont de très faibles facteurs d'amortissement.

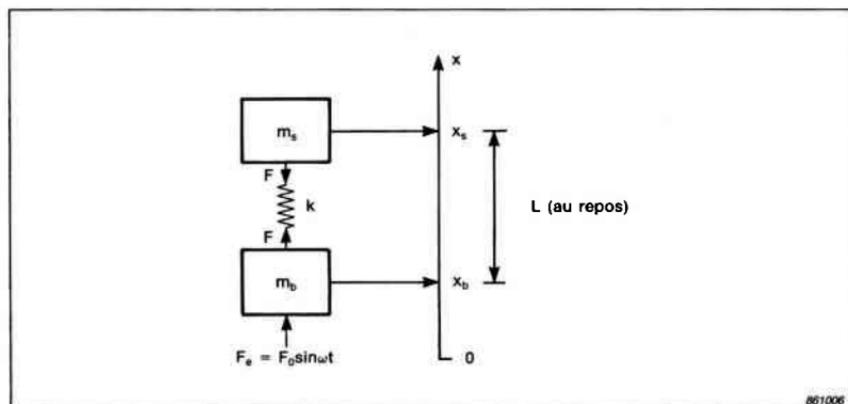


Fig. 2.2. Modèle simplifié d'un accéléromètre

- m_s = masse sismique totale
- m_b = masse de la base de l'accéléromètre
- x_s = déplacement de la masse sismique

- x_b = déplacement de la base de l'accéléromètre
 L = distance entre la masse sismique et la base lorsque l'accéléromètre est au repos dans le système inertiel
 k = rigidité équivalente de l'élément piézoélectrique
 F_e = force d'excitation de l'harmonique
 F_0 = amplitude de la force d'excitation
 ω = fréquence d'excitation = $2\pi f$ (rad/s)
 ω_n = fréquence de résonance naturelle de l'accéléromètre (rad/s)
 ω_m = fréquence de résonance de l'accéléromètre monté (rad/s)
 f_m = fréquence de résonance de l'accéléromètre monté (Hz)
 f = fréquence d'excitation (Hz)

Les expressions suivantes décrivent les forces présentes dans le modèle

$$F = k(x_s - x_b - L) \text{ [force du ressort]}$$

$$m_b \ddot{x}_b = F + F_e \text{ [force appliquée à la base]}$$

$$m_s \ddot{x}_s = -F \text{ [force appliquée aux masses sismiques]}$$

Ce qui donne pour équation du mouvement:

$$\ddot{x}_s - \ddot{x}_b = -\frac{F}{m_s} - \frac{F + F_e}{m_b} = -\frac{k}{\mu} (x_s - x_b - L) - \frac{F_e}{m_b} \quad (1)$$

ou bien

$$\mu \ddot{r} = -kr - \frac{\mu}{m_b} F_0 \sin \omega t$$

où

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_s} + \frac{1}{m_b}$$

ou bien

$$\mu = \frac{m_s m_b}{m_s + m_b}$$

μ est souvent qualifié de «masse réduite» et r de déplacement relatif de la masse sismique vers la base

$$r = x_s - x_b - L$$

Lorsque l'accéléromètre est en position libre et n'est pas excité par des forces externes ($F_e = 0$) l'équation du mouvement pour sa vibration libre est réduite à

$$\mu \ddot{r} = -kr$$

Cette équation différentielle simple peut être résolue en supposant que le déplacement de m_s par rapport à m_b varie harmoniquement avec l'amplitude R . En d'autres termes

$$r = R \sin \omega t$$

$$-\mu R \omega^2 \sin \omega t = -kR \sin \omega t$$

la fréquence de résonance d'un accéléromètre, ω_n , est donc

$$\omega_n^2 = \frac{k}{\mu}$$

Les implications de ce résultat sont mises en évidence en écrivant cette équation comme suit

$$\omega_n^2 = k \left(\frac{1}{m_s} + \frac{1}{m_b} \right) \quad (2)$$

Si l'accéléromètre est maintenant monté rigidement sur une structure dont le poids est supérieur au poids total de l'accéléromètre, m_b devient beaucoup plus grand que m_s . La fréquence de résonance de l'accéléromètre diminue. À la limite, si l'accéléromètre est monté sur une structure dont la masse est *infiniment* grande ($m_b \rightarrow \infty$), la dernière équation devient

$$\omega_m^2 = \frac{k}{m_s} \quad (3)$$

Ceci est la fréquence naturelle du système ressort-masse sismique et est définie comme la *fréquence de résonance de l'accéléromètre monté*, ω_m . Plus loin, on verra que cette fréquence est utilisée pour définir la *gamme fréquentielle utile* de l'accéléromètre.

En réalité, il n'est évidemment pas possible de monter un accéléromètre sur une structure de masse et de rigidité infiniment grandes pour mesurer sa *fréquence de résonance monté*. On obtient une approximation de celle-ci en montant l'accéléromètre sur un bloc d'acier de 180g et en les excitant tous deux à une accélération constante sur une large gamme fréquentielle. Cette situation est examinée Chapitre 5.

La fréquence de résonance monté change si la structure n'est pas infiniment rigide ou si la technique de montage de l'accéléromètre implique une compliance additionnelle entre la base et la structure. La résonance se diviserait en deux et la plus basse des fréquences de résonance serait inférieure à la fréquence de résonance monté. Cette situation est examinée Chapitre 4.

La vibration forcée de l'accéléromètre doit être maintenant étudiée. La force appliquée à l'accéléromètre doit être incluse dans l'analyse, de même que la fréquence de résonance naturelle, ω_n , déjà définie. L'équation du mouvement du modèle (1) devient

$$\ddot{r} + \omega_n^2 r + \frac{F_0}{m_b} \sin \omega t = 0$$

et en supposant encore que les déplacements des masses varient sinusoidalement, on obtient

$$-\omega^2 R \sin \omega t + \omega_n^2 R \sin \omega t + \frac{F_0}{m_b} \sin \omega t = 0$$

d'où

$$R(\omega_n^2 - \omega^2) + \frac{F_0}{m_b} = 0$$

ou bien

$$R = -\frac{F_0}{m_b (\omega_n^2 - \omega^2)}$$

Aux fréquences beaucoup plus basses que la fréquence de résonance naturelle de l'accéléromètre ($\omega \ll \omega_n$), le déplacement, qu'on appellera dorénavant R_0 , s'exprime ainsi

$$R_0 = -\frac{F_0}{m_b \omega_n^2}$$

Le rapport du déplacement en basse fréquence, R_0 , au déplacement en haute fréquence, R , s'écrit comme suit

$$\frac{R}{R_0} = \frac{-\frac{F_0}{m_b (\omega_n^2 - \omega^2)}}{-\frac{F_0}{m_b \omega_n^2}}$$

en appelant ce rapport A , puis après simplification

$$A = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad (4)$$

Cet important résultat démontre que le déplacement entre la base de l'accéléromètre et les masses sismiques augmente lorsque la fréquence d'excitation devient comparable à la fréquence de résonance naturelle de l'accéléromètre. Conséquemment, la force appliquée aux éléments piézoélectriques et la sortie électrique de l'accéléromètre augmentent elles aussi. Puisque les éléments piézoélectriques utilisés dans les accéléromètres Brüel & Kjær ont une sensibilité constante aux forces, l'augmentation de la sortie électrique d'un accéléromètre près de sa fréquence de résonance est totalement attribuable à sa résonance naturelle. La forme typique de la courbe de réponse fréquentielle d'un accéléromètre (voir Fig. 2.3) et les erreurs de mesure d'amplitude sont liées à cette relation. Ceci est couvert dans le paragraphe 2.3.

La fréquence de résonance naturelle de l'accéléromètre non monté dépend étroitement du rapport de la masse sismique totale à la masse du reste du capteur (principalement celle de la base). En règle générale, la masse sismique totale d'un accéléromètre est approximativement la même que la masse de la base et ceci donne la relation

$$\frac{\text{fréquence de résonance monté}}{\text{fréquence de résonance non monté}} \approx \frac{1}{\sqrt{2}}$$

2.3. Gamme fréquentielle

La variation relative de la sortie électrique d'un accéléromètre est montrée Fig. 2.3. Une courbe de réponse fréquentielle de ce genre montre les variations

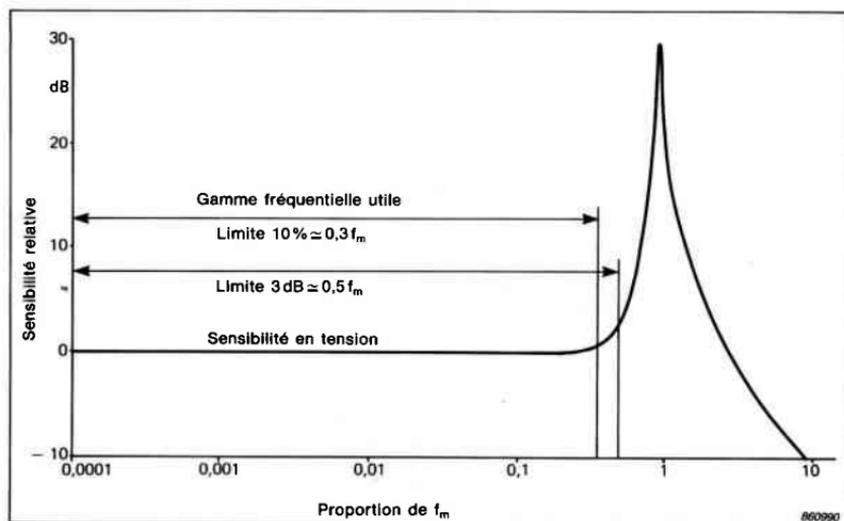


Fig. 2.3. Tracé de la sensibilité relative d'un accéléromètre en fonction de la fréquence

de la sortie électrique de l'accéléromètre lorsqu'il est excité à un niveau vibratoire constant sur une large gamme fréquentielle. Pour obtenir une telle courbe de réponse fréquentielle, on monte l'accéléromètre sur une tête d'excitateur de 180 g. On peut maintenant évaluer la fréquence de résonance de l'accéléromètre monté. La courbe de réponse fréquentielle est liée à l'équation (4). Cependant, la fréquence de résonance monté peut maintenant être directement substituée dans l'équation (4), ce qui donne

$$A = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_m}\right)^2} \quad (5)$$

On peut utiliser l'équation (5) pour évaluer la déviation entre la vibration mesurée et la vibration réelle à toutes les fréquences, et pour définir les gammes fréquentielles utiles.

2.3.1. Limite haute fréquence

La Fig. 2.3 montre que la fréquence de résonance monté détermine la gamme fréquentielle pour laquelle la sortie électrique de l'accéléromètre est constante si l'excitation vibratoire est constante.

Plus la fréquence de résonance est élevée, plus la gamme fréquentielle de fonctionnement est large. Cependant, pour obtenir une plus haute fréquence de résonance monté, il est nécessaire d'avoir des éléments piézoélectriques plus rigides ou bien une masse sismique totale moins grande. La rigidité des éléments piézoélectriques étant constante, c'est une masse sismique totale plus légère qui est donc requise. Une telle masse exercerait une force moins grande sur l'élément piézoélectrique et l'accéléromètre serait donc moins sensible. Ainsi, les accéléromètres ayant des possibilités aux très hautes fréquences sont moins sensibles. Par contre, les accéléromètres très sensibles n'ont pas de bonnes performances aux très hautes fréquences.

De nombreuses gammes fréquentielles utiles peuvent être définies à partir de la réponse fréquentielle d'un accéléromètre. Elles sont les suivantes:

La limite fréquentielle à 5% est la fréquence à laquelle on a une déviation de 5% entre le niveau vibratoire mesuré et le niveau vibratoire réel appliqué à la base de l'accéléromètre. La fréquence vibratoire maximale pouvant être mesurée avec cette précision est environ un cinquième (0,22) de la fréquence de résonance de l'accéléromètre monté.

La limite fréquentielle à 10% est la fréquence à laquelle on a une déviation de 10% entre le niveau vibratoire mesuré et le niveau vibratoire réel appliqué à la base de l'accéléromètre. La fréquence vibratoire maximale pouvant être mesurée avec cette précision est environ un tiers (0,30) de la fréquence de résonance de l'accéléromètre monté.

La limite fréquentielle à 3 dB est la fréquence à laquelle on a une différence de 3dB entre le niveau vibratoire mesuré et le niveau vibratoire réel appliqué à la base de l'accéléromètre. La fréquence vibratoire maximale pouvant être mesurée avec cette précision est environ la moitié (0,54) de la fréquence de résonance de l'accéléromètre monté.

2.3.2. Limite basse fréquence

La réponse fréquentielle des accéléromètres piézoélectriques ne va pas jusqu'à 0 Hz, car les éléments piézoélectriques ne produisent une charge que lorsqu'ils sont excités par des forces *dynamiques*. La limite BF (basse fréquence) réelle est déterminée par le préamplificateur auquel est connecté l'accéléromètre car c'est ce préamplificateur qui détermine le débit de fuite de la charge de l'accéléromètre. Les mesures de vibration à des fréquences aussi basses que 0,003 Hz sont possibles avec les accéléromètres et préamplificateurs Brüel & Kjær.

Les applications demandant une limite BF de l'ordre d'une fraction de hertz sont très rares et le fait que la réponse fréquentielle en basse fréquence n'aille pas jusqu'à 0 Hz est rarement considéré comme un inconvénient.

Le Chapitre 3, «Préamplificateurs de vibration», décrit les performances des préamplificateurs aux basses fréquences. Les effets environnementaux associés aux mesures en basse fréquence sont couverts Chapitre 4 «Performances réelles des accéléromètres».

2.4. MATÉRIAUX PIÉZOÉLECTRIQUES

On qualifie un matériau de piézoélectrique lorsqu'il transforme en charges électriques les forces qui lui sont appliquées. Les matériaux ayant cette propriété sont des monocristaux piézoélectriques intrinsèques tels le quartz, le sel de Rochelle et les céramiques ferroélectriques artificiellement polarisées, qui sont des mélanges de composés divers tels le titanate de baryum et le zirconate de plomb.

Le procédé par lequel les céramiques sont polarisées est similaire au procédé par lequel un morceau d'acier doux est aimanté par un champ magnétique. Une surtension est appliquée entre les deux extrémités du matériau. Les domaines dans la structure moléculaire du matériau s'alignent d'une telle manière qu'une force externe engendre une déformation des domaines et des charges de polarité contraires, aux bouts opposés du matériau. La Fig. 2.4 montre une illustration simplifiée de ce phénomène. Lorsqu'un accéléromètre piézoélectrique vibre, des forces proportionnelles à l'accélération appliquée agissent sur les éléments piézoélectriques et la charge créée par ceux-ci est prélevée par la

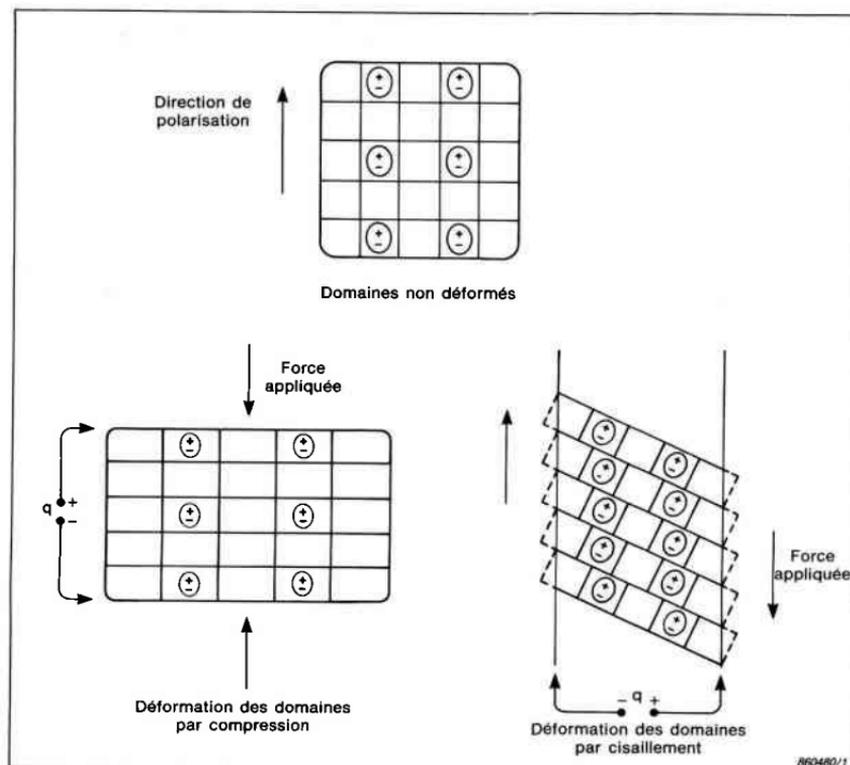


Fig. 2.4. Illustration simplifiée de l'effet piézoélectrique au sein d'une céramique artificiellement polarisée. La charge q est prélevée entre les surfaces indiquées

bague de précontrainte. C'est la relation entre les forces appliquées et la charge créée, extrêmement linéaire sur de très larges gammes dynamique et fréquentielle, qui contribue aux excellentes caractéristiques de l'accéléromètre piézoélectrique. La sensibilité d'un matériau piézoélectrique s'exprime en pC/N .

Un élément piézoélectrique peut supporter la compression aussi bien que le cisaillement (voir Fig. 2.4). Dans les deux cas, une charge est créée le long des surfaces sur lesquelles agissent les forces.

En déformation par compression, la charge est prélevée dans la direction de polarisation. L'inconvénient est que les entrées non-vibratoires telles les variations thermiques engendrent la création de charges dans la direction de polari-

sation. Celles-ci sont aussi prélevées en parallèle avec la charge induite par vibration, et ainsi la sortie de l'accéléromètre n'est plus liée uniquement à l'entrée vibratoire. Cependant, en déformation par cisaillement, la charge est prélevée dans une direction perpendiculaire à celle de la polarisation et la charge additionnelle causée par les fluctuations thermiques n'est pas prélevée. Voilà une des raisons pour lesquelles les accéléromètres à cisaillement donnent de meilleurs résultats que les accéléromètres à compression. L'influence des fluctuations thermiques est discutée en détail dans le paragraphe 4.2.2.

Les céramiques ferroélectriques peuvent être produites sous toute forme désirée et leurs compositions peuvent varier pour leur conférer des propriétés spécifiques à des applications diverses. Ce n'est pas le cas avec les matériaux piézoélectriques monocristallins comme le quartz, dont la composition est fixe et dont la forme est restreinte par la grandeur du cristal à partir duquel ils sont coupés. C'est pour cette raison que les accéléromètres renfermant des éléments monocristallins ont, en général une plus faible sensibilité et une plus basse capacité interne que ceux renfermant des éléments céramiques ferroélectriques.

Pour les accéléromètres Brüel & Kjær, quatre matériaux différents sont employés.

1. **PZ 23** qui, comme le titanate et le zirconate de plomb, appartient à la famille des céramiques ferroélectriques et est polarisé artificiellement. Il peut être utilisé à des températures allant jusqu'à 250°C. Grâce à sa haute sensibilité (env. 300 pC/N) et à ses bonnes caractéristiques, on le retrouve dans la plupart des accéléromètres Brüel & Kjær.
2. Le **PZ 27** est un élément à base de zirconate-titanate de plomb. Il est polarisé artificiellement et très similaire au PZ 23. Il convient à l'utilisation dans les accéléromètres miniatures.
3. Le **PZ 45** est une céramique ferroélectrique polarisée artificiellement et de formule spéciale. Il a une courbe de réponse en température particulièrement plate et peut être utilisé à des températures allant jusqu'à 400°C. Il est utilisé dans les accéléromètres différentiels exposés à des températures élevées et à des chocs intenses.
4. Le **PZ 100** est un cristal de quartz soigneusement choisi et élaboré. Il peut être utilisé à des températures allant jusqu'à 250°C et possède une excellente stabilité avec une faible sensibilité aux transitoires thermiques. Il est par conséquent utilisé dans l'Accéléromètre de référence standard Type 8305 et dans les capteurs de force Brüel & Kjær.

La fiche technique de chaque accéléromètre Brüel & Kjær mentionne le type d'élément piézoélectrique utilisé.

2.5. CONCEPTIONS D'ACCÉLÉROMÈTRES

Trois constructions mécaniques différentes sont employées dans la conception des accéléromètres Brüel & Kjær. Les deux premières, le cisaillement plan et le Cisaillement en delta[®] sont illustrées Fig. 2.5. Le montage à compression centrale (voir Fig. 2.6) est aussi utilisé. Grâce à ses meilleures caractéristiques, la conception à Cisaillement en delta[®] est employée dans la presque totalité des accéléromètres Brüel & Kjær.

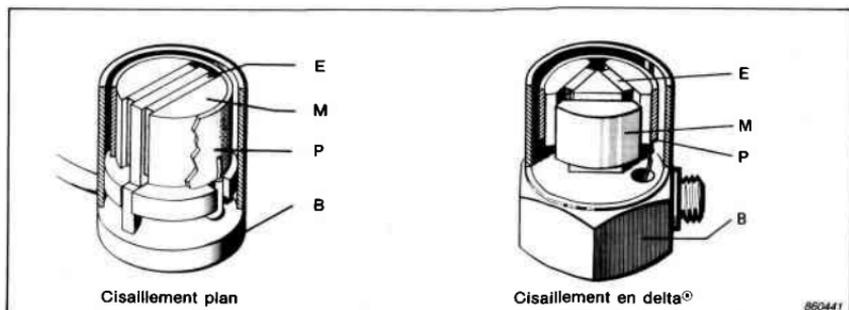


Fig. 2.5. Conceptions cisaillement plan et Cisaillement en delta[®]. M=masse sismique, E=élément piézoélectrique, P=bague de précontrainte et B=base

1. **Cisaillement en delta[®].** Trois éléments piézoélectriques et trois masses sismiques sont arrangés autour d'un plot central triangulaire et solidement maintenus sur celui-ci à l'aide d'une bague de précontrainte travaillant à l'extension. Avec cette technique, l'utilisation d'adhésifs pour relier les masses sismiques aux éléments piézoélectriques est inutile, ce qui assure une très bonne stabilité à long terme, et une très bonne linéarité en amplitude. La charge est prélevée entre le boîtier et la bague de précontrainte.

Le Cisaillement en delta[®] donne un grand rapport sensibilité/masse comparé à celui d'autres conceptions. Il offre une fréquence de résonance relativement élevée et une très bonne isolation des contraintes de base et des transitoires thermiques. Les excellentes caractéristiques d'ensemble de cette conception sont idéales pour les accéléromètres d'usage général et les types plus spéciaux.

2. **Cisaillement plan.** Dans cette conception, l'élément sensible subit une déformation en cisaillement tout comme dans la conception à Cisaillement en delta[®]. Deux lamelles rectangulaires de nature piézoélectrique sont disposées de part et d'autre d'un plot central rectangulaire. Deux masses

ismiques sont maintenues fixes à l'aide d'une bague de précontrainte travaillant à l'extension (voir Fig. 2.5). La base est isolée des éléments piézoélectriques, ce qui implique une excellente immunité aux contraintes de base et aux fluctuations thermiques.

- 3. Montage à compression centrale.** Cette conception de construction simple donne un modeste rapport sensibilité/masse. Le système «élément piézoélectrique/masse/ressort» est monté sur un plot central cylindrique fixé à la base de l'accéléromètre (Voir Fig. 2.6). Puisque la base et le plot central agissent comme un ressort en parallèle avec les éléments piézoélectriques, tout changement dynamique au niveau de la base (déformation, expansion thermique) peut causer des contraintes sur les éléments piézoélectriques et donc des erreurs à la sortie. Bien que Brüel & Kjær emploie des bases très épaisses afin de minimiser ces problèmes, les forces de déformation peuvent toujours être transmises aux éléments piézoélectriques. Il en résulte une sortie erronée indépendante de la vibration mesurée, à la fréquence de cette vibration. On a vu, dans le paragraphe précédent, que les fluctuations thermiques pouvaient aussi produire des charges dans les éléments piézoélectriques. Ces charges sont prélevées dans les montages à compression.

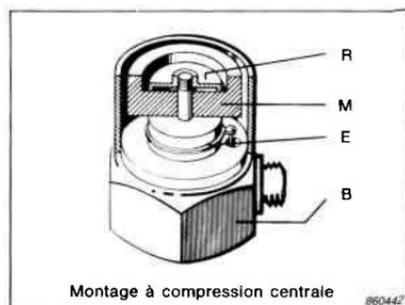


Fig. 2.6. Montage à compression. M=masse sismique, E=élément piézoélectrique, B=base et R=ressort

Pour les raisons sus-citées, Brüel & Kjær ne produit des accéléromètres à compression centrale que pour les mesures de hauts niveaux (par ex. mesures de chocs) où les erreurs de sortie sont petites comparées aux niveaux de vibration. Les montages à compression sont aussi employés dans l'accéléromètre de référence utilisé dans les environnements contrôlés pour l'étalonnage d'accéléromètres. Ici, l'addition d'un disque de béryllium renforce la base et minimise les effets de déformation de celle-ci. Cet accéléromètre est monté à l'envers pour mesurer avec plus de précision la vibration à la base de l'accéléromètre à étalonner.

2.5.1. Accéléromètres Line-Drive

Ces accéléromètres sont dotés d'un préamplificateur incorporé. Un accéléromètre Line-Drive est illustré Fig. 2.7. La conception de la partie accéléromètre est similaire à celle à Cisaillement en delta[®] décrite plus-haut. La partie électronique fait appel aux techniques hybrides pour produire un préamplificateur ayant de très bonnes caractéristiques. Le Chapitre 3 décrit le fonctionnement de la partie préamplificateur.

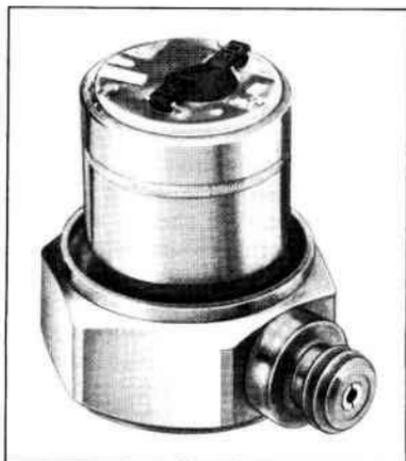


Fig. 2.7. Accéléromètre Line-Drive de Brüel & Kjær avec son boîtier retiré pour révéler l'électronique intégrée

Les accéléromètres Line-Drive requièrent une source d'alimentation externe pour leur fonctionnement. Le préamplificateur incorporé est alimenté par une tension constante et les signaux vibratoires sont retransmis à la source d'alimentation externe sous forme de courant modulé. Ce système est aussi décrit Chapitre 3.

Les préamplificateurs incorporés sont cependant limités par la température et l'intensité du choc. Pour éviter ces inconvénients, Brüel & Kjær produit aussi des préamplificateurs Line-Drive séparés pour utilisation avec les accéléromètres.

2.5.2. Autres conceptions

D'autres conceptions d'accéléromètres existent, fondées sur les principes de déformation par compression aussi bien que par cisaillement. Brüel & Kjær n'utilise que les montages déjà cités car ils donnent, notamment le montage à

Cisaillement en delta[®], les résultats les plus fiables qui soient. On peut cependant trouver d'autres montages.

Construction à cisaillement annulaire avec la masse sismique sertie autour de l'élément piézoélectrique pour provoquer une force de cisaillement.

Construction à cisaillement isolé similaire au montage à cisaillement plan, sauf que les éléments sensibles sont montés sur le support central à l'aide d'un goujon.

2.6. SENSIBILITÉ DE L'ACCÉLÉROMÈTRE

Jusqu'ici, on a vu que l'accéléromètre est un instrument générateur de charge dont la sortie électrique est proportionnelle à l'accélération appliquée. Dans le but d'établir que le rôle de l'accéléromètre est celui d'un instrument de mesure, la relation entre son entrée (accélération) et sa sortie (charge électrique ou tension) est maintenant examinée avec plus de détails.

2.6.1. Sensibilités en charge et en tension

L'accéléromètre piézoélectrique peut être perçu comme une source de charge ou de tension. L'élément sensible agit comme un condensateur, C_a , en parallèle avec une très grande résistance de fuite interne, R_a , laquelle, pour des raisons pratiques, peut être ignorée. Il peut être traité soit comme une source de charge idéale, Q_a , en parallèle avec C_a et la capacité du câble, C_c , soit comme une source de tension V_a en série avec C_a et chargée par C_c (voir Fig. 2.8). Cette figure montre les circuits équivalents pour les deux modèles, pouvant être utilisés indépendamment selon celui qui permet les calculs les moins difficiles.

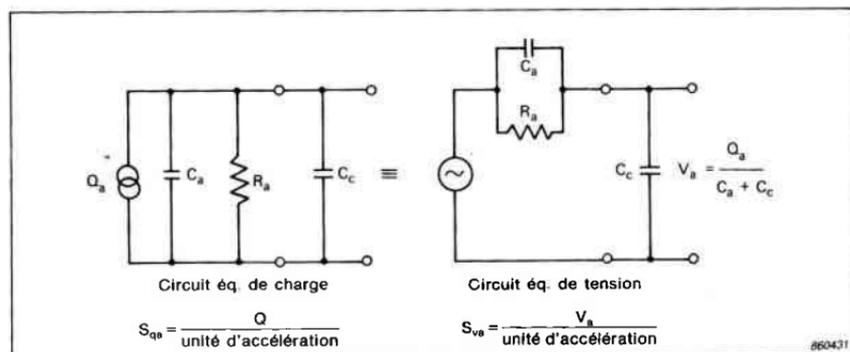


Fig. 2.8. Circuits électriques équivalents pour un accéléromètre piézoélectrique et son câble de connexion

Le choix d'un préamplificateur d'accéléromètre dépend du désir de l'utilisateur de détecter une charge ou une tension à la sortie électrique de l'accéléromètre.

La sensibilité en charge, S_{qa} , d'un accéléromètre piézoélectrique est étalonnée en termes de charge (mesurée en pC) par unité d'accélération:

$$S_{qa} = \frac{pC}{ms^{-2}} = \frac{pC_{eff}}{ms^{-2}_{eff}} = \frac{pC_{crête}}{ms^{-2}_{crête}}$$

De même, la sensibilité en tension est exprimée en volts par unité d'accélération:

$$S_{va} = \frac{mV}{ms^{-2}} = \frac{mV_{eff}}{ms^{-2}_{eff}} = \frac{mV_{crête}}{ms^{-2}_{crête}}$$

On peut voir, à partir des diagrammes simplifiés, que la tension produite par l'accéléromètre est partagée entre la capacité de l'accéléromètre et la capacité du câble. Ainsi, une variation de la capacité du câble, due à l'utilisation d'un câble de type différent et/ou à une différente longueur de câble, causera une variation de la sensibilité en tension. Un nouvel étalonnage de la sensibilité sera

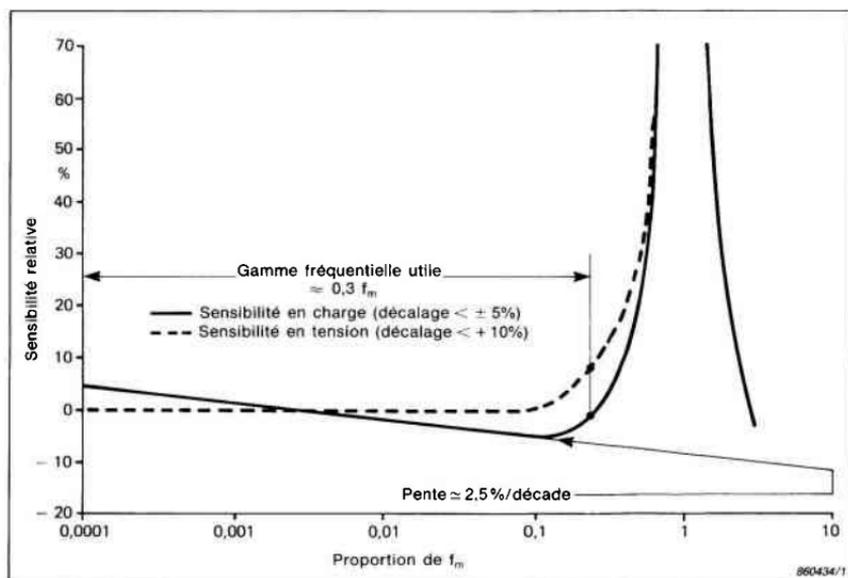


Fig. 2.9. Sensibilités en tension et en charge en fonction de la fréquence pour un accéléromètre utilisant le matériau piézoélectrique PZ 23

donc requis. Voilà un grand inconvénient inhérent à la préamplification de tension que l'on examinera en détail Chapitre 3. Les amplificateurs de charge sont aujourd'hui beaucoup plus utilisés.

Aux basses et moyennes fréquences, dans la gamme fréquentielle utile d'un accéléromètre, la sensibilité en tension est indépendante de la fréquence. Ce détail concerne aussi la sensibilité en charge des accéléromètres employant les éléments piézoélectriques PZ 45 et PZ 100, mais pas ceux utilisant le PZ 23 et le PZ 27. Les PZ 45 et PZ 100 ont été conçus de telle façon que la sensibilité en charge et la capacité décroissent avec la fréquence d'environ 2,5% par décade. L'effet de cette diminution est de partiellement réduire la sortie, à la résonance. La déviation maximale entre l'accélération mesurée et l'accélération réelle, dans la gamme fréquentielle utile d'un accéléromètre employant le PZ 23 et avec des fréquences de résonance moyennes à élevées, n'est que de $\pm 5\%$ de l'accélération appliquée à la base de l'accéléromètre (voir Fig. 2.9).

2.6.2. Sensibilité Uni-Gain®

Presque tous les accéléromètres Brüel & Kjær sont de conception Uni-Gain®. C'est à dire que leurs sensibilités mesurées ont été ajustées à 2% d'une valeur pratique comme 1; 3,16; 10 ou 31,6 pC/ms⁻². Avec des accéléromètres Uni-Gain®, un accéléromètre peut être remplacé par un autre du même type sans ajustement de tout autre instrument. Puisque les valeurs citées plus haut sont séparées l'une de l'autre de 10 dB, le calibrage des systèmes de mesure est très simple. Par exemple, si un accéléromètre était remplacé par un autre de type différent, seuls des changements de gain fixes de 10 dB seraient requis au niveau des instruments de mesure.

Les sensibilités Uni-Gain® sont acquises par un choix étudié de la masse des éléments sismiques.

2.6.3. Linéarité et gamme dynamique

La linéarité est une caractéristique fondamentale propre à tout système de mesure. La sortie d'un système doit être linéairement liée à l'entrée sur une large gamme dynamique et fréquentielle. L'excellente linéarité des accéléromètres Brüel & Kjær est illustrée Fig. 2.10.

L'accéléromètre piézoélectrique est un instrument extrêmement linéaire sur une très large gamme dynamique grâce aux bonnes caractéristiques de linéarité des éléments sensibles. En théorie, l'accéléromètre est linéaire jusqu'à une accélération nulle. Cependant, une limite inférieure pratique est déterminée par le bruit inhérent au système de mesure. Ce bruit peut avoir plusieurs origines et celles-ci sont examinées Chapitres 3 et 4.

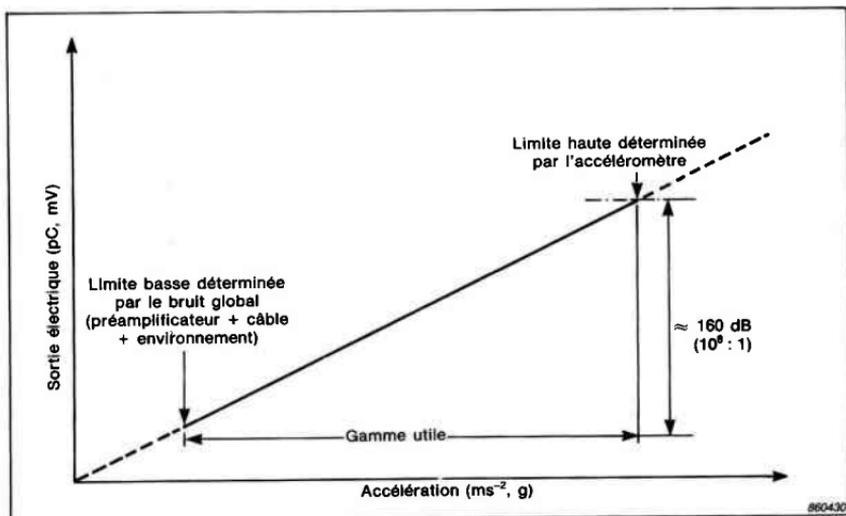


Fig. 2.10. Sortie d'un accéléromètre piézoélectrique en fonction de son accélération, montrant la linéarité et la largeur de la gamme dynamique

Lorsqu'un accéléromètre est utilisé au-delà de sa limite maximale d'accélération, ses performances tendent à être de plus en plus non-linéaires. À des niveaux très supérieurs à cette limite maximale, la bague de précontrainte commence à glisser vers le bas des éléments sensibles et finit éventuellement par court-circuiter la base. En réalité, ce genre d'incident n'arrive jamais à moins que l'accéléromètre ne soit confronté à des niveaux de choc bien en dehors de sa gamme de fonctionnement spécifiée.

2.6.4. Sensibilité transversale

Lorsqu'une accélération est appliquée perpendiculairement à l'axe de montage d'un accéléromètre, il y a quand même une faible sortie. Idéalement, la sensibilité transversale d'un accéléromètre doit être nulle, mais en réalité, de petites irrégularités au niveau des éléments sensibles et des parties métalliques l'en empêchent. Chez Brüel & Kjær, une attention particulière est portée au choix de céramiques piézoélectriques homogènes ainsi qu'à l'usinage, le polissage et le montage des différentes parties de l'accéléromètre. Sur la fiche d'étalonnage de l'accéléromètre, la sensibilité transversale s'exprime en pourcentage de la sensibilité de l'axe principal. Ainsi, la sensibilité transversale maximale de la plupart des accéléromètres Brüel & Kjær peut être maintenue en dessous de 4% de la sensibilité de l'axe principal à 30 Hz (voir Fig. 2.11).

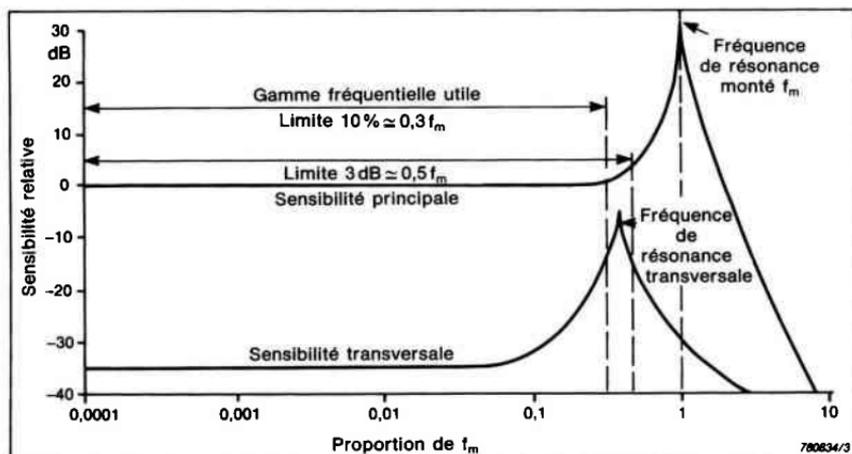


Fig. 2.11. Réponse relative d'un accéléromètre aux vibrations par rapport à l'axe principal et à l'axe de montage

À des fréquences plus basses que le 1/6 de la fréquence de résonance monté de l'axe principal, la sensibilité transversale peut être maintenue en dessous de 10%. À un peu plus du 1/3, il est difficile de spécifier des valeurs exactes de la sensibilité transversale car la résonance transversale apparaît. Voir Fig. 2.11.

Comme on peut constater Fig. 2.12, la sensibilité transversale peut être perçue comme le résultat d'un désalignement de l'axe de sensibilité maximale en charge et en tension avec l'axe de montage de l'accéléromètre. C'est pourquoi on a deux directions de sensibilité transversale, l'une maximale et l'autre minimale, et un axe de sensibilité principale, tous trois mutuellement perpendiculaires. C'est donc la sensibilité transversale maximale que l'on spécifie sur la fiche d'étalonnage de l'accéléromètre. La direction de sensibilité minimale est marquée d'un point rouge sur le boîtier de l'accéléromètre. Ceci est une caractéristique unique aux accéléromètres Brüel & Kjær.

On devrait noter que la conception à Cisaillement en Delta[®], outre sa rigidité constante dans toutes les directions, n'a qu'une seule résonance transversale. D'autres conceptions à cisaillement peuvent en avoir deux ou plusieurs.

Puisque la résonance transversale est juste en dehors de la gamme fréquentielle utile et que son amplitude de crête est légèrement inférieure à celle de l'axe principal, il est important que les vibrations et chocs transversaux soient bien en dessous des limites spécifiées pour des vibrations continues de l'axe principal. De même, si un accéléromètre tombe ou reçoit un choc, il se peut qu'il subisse des chocs transversaux bien au-delà des limites imposées par sa

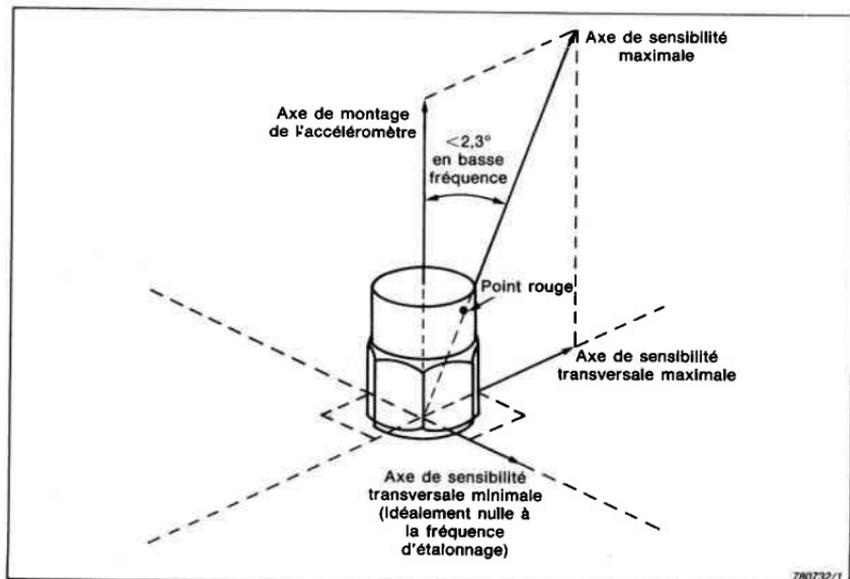


Fig. 2.12. Représentation vectorielle de la sensibilité transversale

conception, et qu'une détérioration permanente atteigne ses éléments sensibles.

Les précautions suivantes sont recommandées à l'encontre des vibrations transversales sévères:

1. Aligner le point rouge sur la direction d'accélération transversale maximale.
2. Utiliser un filtre mécanique afin d'éliminer les vibrations dans des directions autres que celle de l'axe principal.
3. Utiliser le diagramme polaire de la Fig. 2.13 pour calculer la sensibilité aux vibrations dans toutes les directions à partir de la sensibilité transversale maximale.

Exemple. À 60° de l'axe de sensibilité maximale, le diagramme indique un facteur de sensibilité transversale de 0,5. (Cette valeur aurait aussi bien pu être calculée à partir du cosinus de l'angle). Donc, un accéléromètre ayant une sensibilité transversale maximale de 2% aura une sensibilité transversale à 60° de:

$$0,5 \times 2\% = 1\%$$

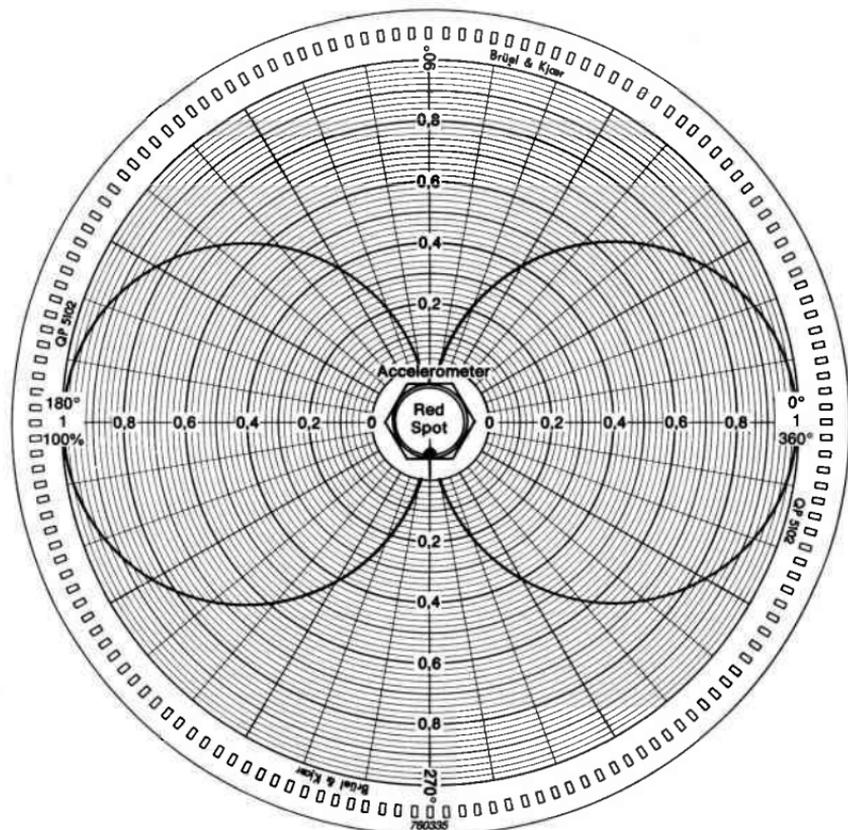


Fig. 2.13. Diagramme polaire pour déterminer la sensibilité d'un accéléromètre dans n'importe quelle direction dès lors que la sensibilité transversale maximale est connue.

2.7. RÉPONSE EN PHASE

Le déphasage d'un accéléromètre correspond au temps s'écoulant entre l'entrée dynamique et la sortie électrique qui en résulte. Si le déphasage n'est pas constant à toutes les fréquences de la gamme de fonctionnement, la relation en phase entre diverses composantes fréquentielles du signal vibratoire est altérée. Il en résulte une sortie électrique donnant une représentation déformée de l'entrée.

Les réponses en phase et en sensibilité d'un accéléromètre sont montrées dans la Fig. 2.14. À des fréquences inférieures à la résonance de l'accéléromètre-

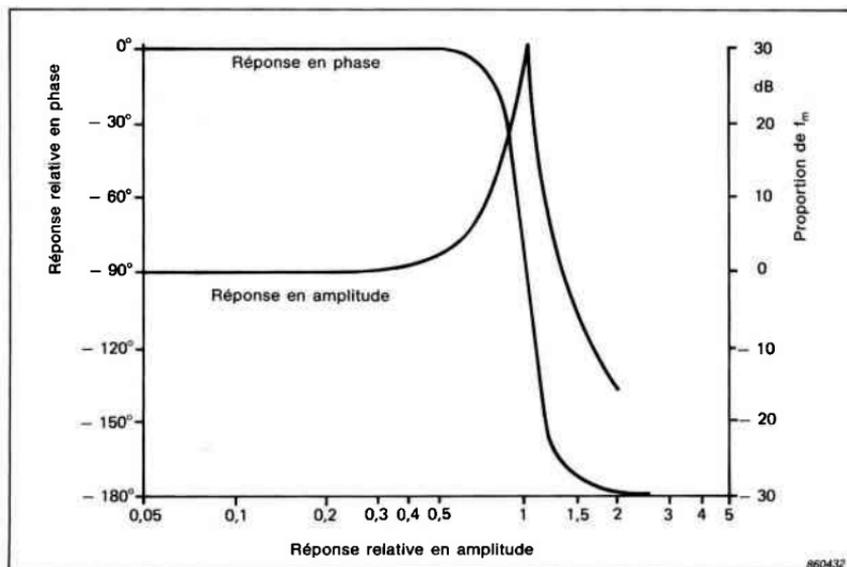


Fig. 2.14. Réponse d'un accéléromètre en phase et en amplitude en fonction de la fréquence

tre monté, le déphasage introduit est négligeable. Aux fréquences très proches de celle de la résonance, le mouvement des masses sismiques est en retard sur celui de la base, et il s'ensuit une distorsion de phase. Les accéléromètres Brüel & Kjær donnant une résonance très pointue, leurs faibles facteurs d'amortissement de la résonance assurent une étroitesse de la gamme fréquentielle sur laquelle la résonance a lieu. Ainsi, sans qu'une distorsion de phase ne soit introduite, l'accéléromètre peut rester fonctionnel bien au-delà de sa gamme fréquentielle utile spécifiée.

Néanmoins, il est aussi nécessaire de prendre en considération la linéarité de phase du préamplificateur de charge ou de tension employé, notamment si on utilise des réseaux d'intégration et des filtres. Ceci est d'autant plus important lors des mesures de transitoires et de chocs.

2.8. RÉPONSE AUX TRANSITOIRES

Lors des mesures de transitoires vibratoires et de chocs, on doit porter une attention particulière à la linéarité d'ensemble du système. Sinon, les transitoires reproduits seront déformés. Les accéléromètres piézoélectriques sont des capteurs extrêmement linéaires et reproduisent facilement une large gamme de transitoires. L'accéléromètre est la source d'erreurs la moins fréquente lors des

mesures de transitoires. Par contre, les sources d'erreurs les plus communes sont le préamplificateur et tous les filtres associés ainsi que les réseaux d'intégration. Cependant, pour s'assurer de la précision des mesures, les phénomènes transitoires suivants sont à considérer.

2.8.1. Effets de fuite

Dans la Fig. 2.15, une distorsion affecte la courbe d'une impulsion d'accélération quasi-statique, ce qui peut être rencontré lors d'un lancement de fusée ou dans un ascenseur rapide. La distorsion causée par le fonctionnement du système «accéléromètre-préamplificateur» dans une gamme fréquentielle incorrecte s'explique ainsi:

Lorsque l'accéléromètre est soumis à une accélération quasi-statique, une charge se crée sur les éléments sensibles. En vertu des propriétés capacitives de ces éléments, cette charge est conservée dans les éléments mêmes car elle est empêchée de «fuir» par la très grande résistance de fuite de l'accéléromètre. Néanmoins, la constante de temps de fuite étant finie et à cause de l'impédance d'entrée et de la limite BF du préamplificateur, une petite quantité de charge parvient à fuir. Il en résulte une portion de courbe de pente négative telle celle entre les points A et B. Lorsque l'accélération s'arrête, la charge change proportionnellement et descend en dessous du niveau zéro jusqu'au point C, pour ensuite remonter au niveau zéro au point D. La variation exponentielle entre A et B est la même qu'entre C et D. Elle est déterminée par la constante de temps imposée par l'accéléromètre et son préamplificateur.

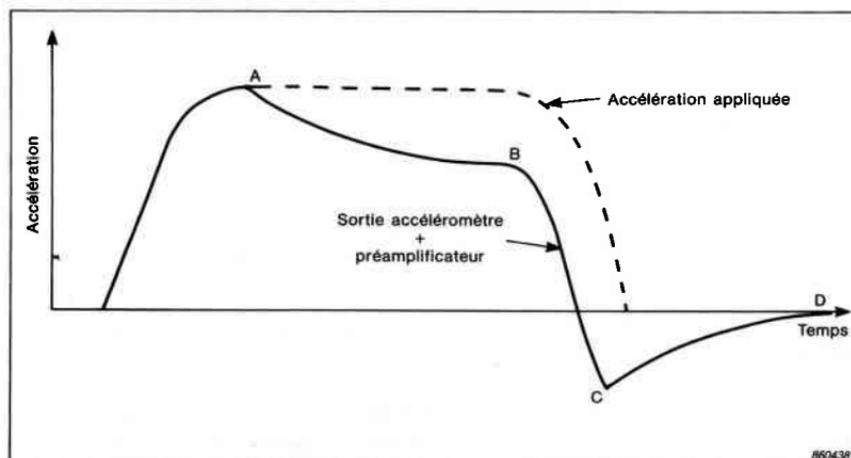


Fig. 2.15. Distorsion de la courbe d'une accélération quasi-statique suite à une fuite associée à un accéléromètre et à son préamplificateur

Cet effet est une source d'erreurs dans les mesures d'amplitude de crête de l'accélération, et est dû au fait que l'accéléromètre est employé avec un mauvais choix de limite BF pour le préamplificateur. Les erreurs de mesure d'amplitude de crête dues aux fuites peuvent être maintenues en deçà de 5% en s'assurant que la limite BF du préamplificateur à -3 dB est inférieure à $0,008/T$, où T est la période d'une transitoire d'onde rectangulaire. Pour les mesures de transitoires de demi-sinusoïdes, la limite BF doit être inférieure à $0,05/T$.

La largeur de bande fréquentielle de l'ensemble du système de mesure requise pour la mesure de telles transitoires avec une précision spécifiée peut être déduite de la Fig. 2.16. De la même figure, on déduit également les restrictions sur la limite HF, car les signaux transitoires ont des composantes de haute fréquence devant être reproduites sans distorsion.

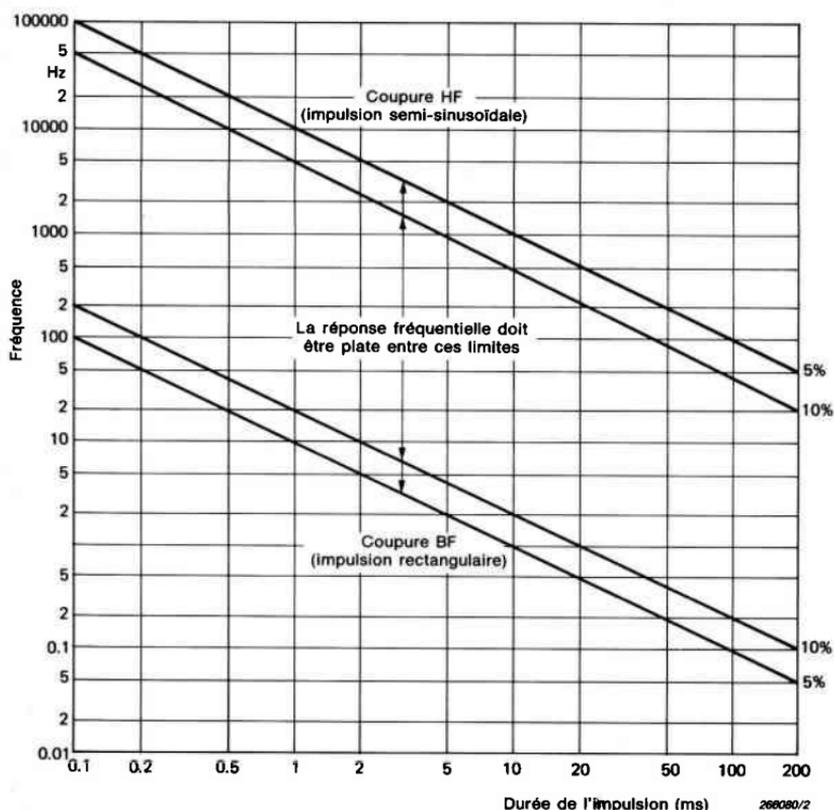


Fig. 2.16. Limites BF et HF à -3dB requises pour mesurer l'accélération des impulsions de durée T, les erreurs de mesure d'amplitude étant inférieures à 5% et 10% respectivement

La distorsion des courbes de transitoires, notamment les vibrations quasi-statiques, causée par l'utilisation d'un accéléromètre dans une gamme fréquentielle incorrecte peut paraître similaire à la distorsion engendrée par d'autres phénomènes, comme la déviation du zéro (voir paragraphe 2.8.3), mais le lecteur doit comprendre que les causes, donc les solutions, des problèmes sont différentes.

2.8.2. «Ringing»

Ce terme est employé pour décrire la distorsion produite par un accéléromètre utilisé pour mesurer les transitoires vibratoires en dehors de sa gamme fréquentielle utile. Un exemple du signal distors résultant est montré Fig. 2.17. La résonance de l'accéléromètre est excitée avec des composantes vibratoires de haute fréquence, ce qui doit être évité. On peut recevoir un premier avertissement de «ringing» par une indication de surcharge au niveau du préamplificateur.

Le «ringing» implique des erreurs dans les mesures d'amplitude de crête des vibrations. Pour un pourcentage d'erreur de 5% sur la mesure de crête, la fréquence de résonance monté de l'accéléromètre ne doit pas être inférieure à $10/T$, où T représente la durée du transitoire en secondes.

On peut amortir la résonance de l'accéléromètre afin de réduire son «ringing» et faire une utilisation maximale de la gamme dynamique et de la largeur de bande du système de mesure. On y parvient en utilisant un filtre mécanique lors du montage d'un accéléromètre (voir paragraphe 4.5) ou en appliquant le signal de l'accéléromètre à un préamplificateur incorporant un filtre passe-bas. Dans ce cas, le filtre doit avoir une pente d'atténuation en haute fréquence de 12dB/octave et une limite HF f_h à -3dB correspondant à environ la moitié de la fréquence de résonance de l'accéléromètre monté f_m (c.-à-d. $f_h = 0,5 f_m$). Ceci donne la réponse montrée Fig. 2.18, permettant au transitoire d'une demisinusoïde de durée $T = 1/f_m$ d'être mesuré avec moins de 10% d'erreur sur l'amplitude.

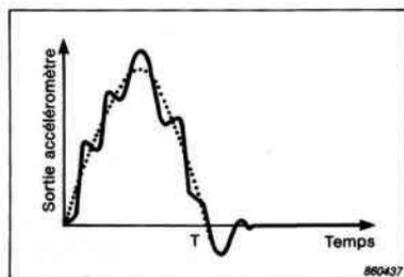


Fig. 2.17. Distorsion due au «ringing»

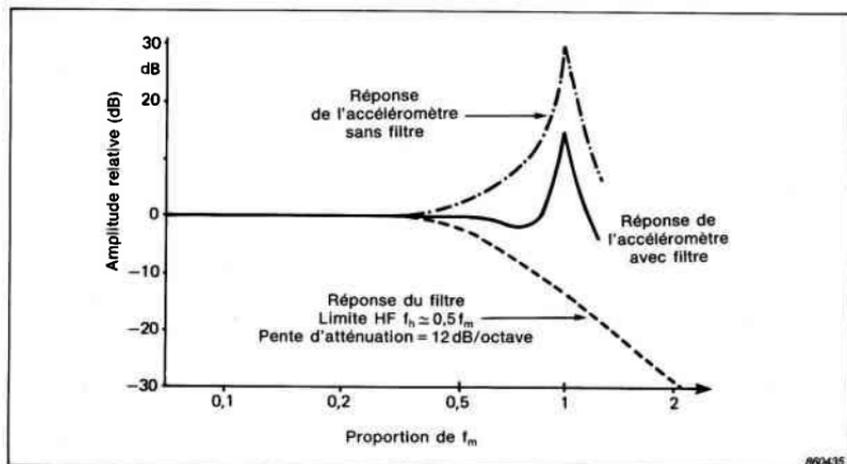


Fig. 2.18. Réponse de filtre passe-bas ou de préamplificateur requise pour l'amortissement de la fréquence de résonance f_m d'un accéléromètre, pour la mesure des impulsions de choc du type semi-sinusoïdal de durée $T = 1/f_m$ secondes avec moins de 10% d'erreur sur l'amplitude

2.8.3. Déviation du zéro

Considérons les signaux de sortie Fig. 2.19 résultant de deux impulsions semi-sinusoïdales. Dans les deux cas, la distorsion de l'onde a été introduite par l'accéléromètre, les niveaux dynamiques des mesures étant très proches de la limite supérieure d'accélération de l'accéléromètre.

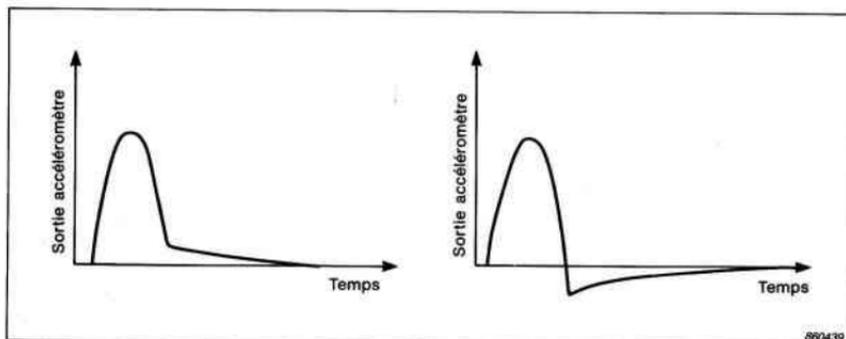


Fig. 2.19. Sorties d'accéléromètre et de préamplificateur résultant d'une impulsion semi-sinusoïdale d'un niveau si haut que la déviation du zéro fut introduite

Puisque les éléments piézoélectriques n'étaient pas considérés comme des matériaux parfaitement élastiques, lorsque la force appliquée à l'élément est brusquement réduite, les domaines moléculaires pourraient ne pas tous retourner à leur état initial, avant que la force de cisaillement ne soit appliquée. Ainsi, lorsque cette force n'est plus appliquée, les éléments produisent toujours une charge. Celle-ci décroît lentement avec le temps pendant que la sortie du préamplificateur retourne à zéro à une vitesse déterminée par sa limite BF. Ce phénomène est aléatoire et son signe aussi.

Le temps que met la déviation du zéro pour disparaître est environ 1000 fois plus long que la durée de l'impulsion originale. Par conséquent, de grandes erreurs résultent de l'utilisation de réseaux d'intégration.

Les filtres mécaniques protègent souvent les accéléromètres des effets de la déviation du zéro.

RAPPEL: La déviation du zéro, les fuites et le «ringing» de la résonance ne sont réellement des problèmes que lorsque les accéléromètres sont utilisés en dehors de leurs gammes fréquentielles utiles.

3. PRÉAMPLIFICATEURS DE VIBRATIONS

Les préamplificateurs de vibrations ont un rôle essentiel dans la conversion de la grande impédance de sortie de l'accéléromètre en un signal de faible impédance convenable à la transmission directe vers les instruments de mesure et d'analyse.

De plus, le préamplificateur peut aussi bien accomplir quelques unes, sinon toutes, des fonctions suivantes:

1. Adaptation entre la sensibilité d'entrée des instruments de mesure et la sensibilité de sortie de l'accéléromètre.
2. Amplification du signal vibratoire pour obtention de la sensibilité globale désirée.
3. Intégration de la sortie de l'accéléromètre pour obtention de signaux de vitesse et de déplacement.
4. Indication des surcharges à l'entrée aussi bien qu'à la sortie du préamplificateur.
5. Filtrage des basses et hautes fréquences pour rejet de tout signal indésirable.

La gamme complète des préamplificateurs de vibration d'usage général offerte par Brüel & Kjær est illustrée Fig. 3.1. Les préamplificateurs Brüel & Kjær sont disponibles sous les formes suivantes.



Fig. 3.1. La gamme de préamplificateurs disponible chez Brüel & Kjær

1. Unités accomplissant la plupart des fonctions citées plus haut. Elles sont alimentées sur piles ou sur secteur. Voir Appendice E.
2. Parties du circuit d'entrée des instruments de mesure tels les mesureurs de vibrations ou les modules d'entrée des enregistreurs magnétiques. Ces instruments sont énumérés dans l'appendice F.
3. Préamplificateurs Line-Drive tout à fait différents de (1) et (2). Il s'agit d'instruments miniatures ne retenant des préamplificateurs ordinaires que la «face avant», et qui sont incorporés, montés directement ou placés à proximité des accéléromètres. Un seul câble coaxial ou à deux conducteurs est requis pour l'alimentation et pour la transmission des signaux. Les préamplificateurs Line-Drive sont des instruments à gain fixe et sans boutons de commande.

3.1. CONCEPTION ET FONCTIONNEMENT D'UN PRÉAMPLIFICATEUR

Il existe deux genres de préamplificateurs pouvant être utilisés avec les accéléromètres piézoélectriques.

1. Les préamplificateurs de charge. Ceux-ci produisent une tension de sortie proportionnelle à la charge d'entrée. Ils n'amplifient pas la charge!
2. Les préamplificateurs de tension. Ceux-ci produisent une tension de sortie proportionnelle à la tension d'entrée.

Les préamplificateurs de charge sont généralement utilisés en préférence aux préamplificateurs de tension. Ceci se reflète dans la gamme actuelle des préamplificateurs Brüel & Kjær où seul le 2650 offre à la fois une entrée de charge et une entrée de tension. Ce préamplificateur est conçu pour l'étalonnage d'accéléromètres plutôt que pour les mesures de vibrations. Le net avantage des préamplificateurs de charge est que des câbles très courts ou très longs peuvent être utilisés sans que la sensibilité globale du système ne change. Cependant, lorsqu'un préamplificateur de tension est utilisé, tout changement de la longueur de câble nécessite un nouveau calibrage de la sensibilité du système. Voir paragraphe 2.6.1.

3.2. PRÉAMPLIFICATEURS DE CHARGE

Un préamplificateur de charge utilise un étage d'entrée à amplificateur opérationnel. La disposition de celui-ci avec le condensateur dans la boucle de contre-réaction, fonctionne comme un réseau d'intégration et intègre le courant à l'entrée. Ce courant est le résultat de la charge créée à travers les éléments sensibles de forte impédance. Le préamplificateur cherche à réduire ce courant à zéro et produit ainsi une tension de sortie proportionnelle à la charge.

3.2.1. Sensibilité en charge

La tension de sortie d'un préamplificateur de charge est proportionnelle à la charge d'entrée et donc à l'accélération de l'accéléromètre. Le gain est contrôlé par la capacité de contre-réaction en parallèle avec l'amplificateur opérationnel.

La Fig. 3.2. montre un circuit équivalent pour un accéléromètre piézoélectrique connecté à un préamplificateur de charge. La nomenclature ci-dessous se réfère à cette figure.

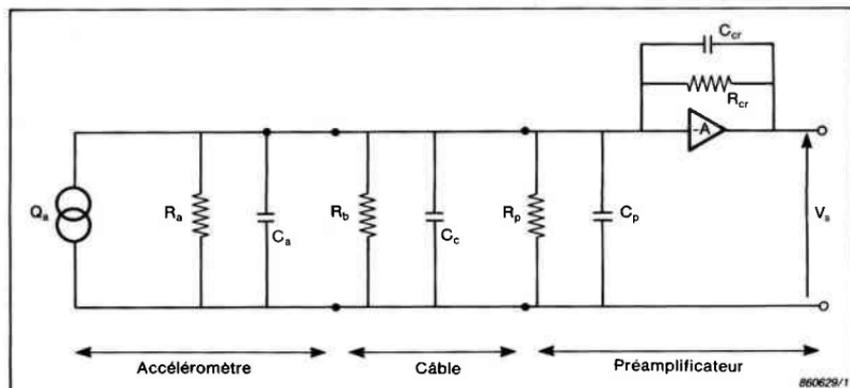


Fig. 3.2. Circuit équivalent d'un accéléromètre et de son câble connecté à un préamplificateur de charge

- Q_a = charge générée par les éléments piézoélectriques (proportionnelle à l'accélération appliquée)
- C_a = capacité de l'accéléromètre
- R_a = résistance de l'accéléromètre
- C_c = capacité du câble et des connecteurs
- R_b = résistance entre le blindage du câble et le conducteur central
- C_p = capacité d'entrée du préamplificateur
- R_p = résistance d'entrée du préamplificateur
- C_{cr} = capacité de contre-réaction
- R_{cr} = résistance de contre-réaction
- A = gain de l'amplificateur opérationnel
- V_s = tension de sortie du préamplificateur

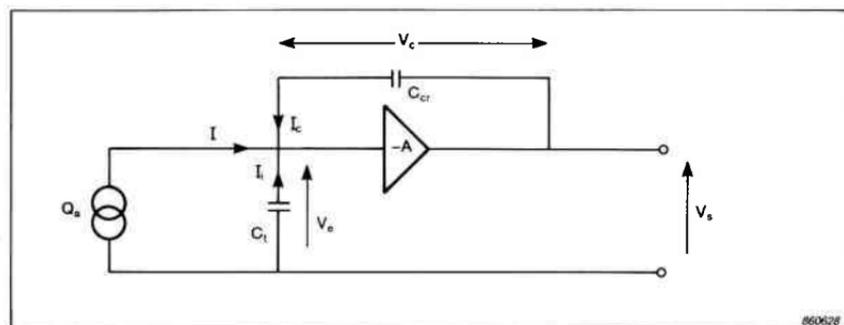


Fig. 3.3. Circuit équivalent simplifié d'un accéléromètre connecté à un préamplificateur de charge

Normalement, les résistances de l'accéléromètre, de l'entrée du préamplificateur et de la boucle de contre-réaction sont très élevées. Par conséquent, le circuit de la Fig. 3.2 peut être réduit à celui montré Fig. 3.3, où sont indiqués les courants et la capacité totale

- $C_t = C_a + C_c + C_p$
- $I =$ courant total issu de l'accéléromètre
- $I_i =$ courant issu de C_t
- $I_c =$ courant dans la boucle de contre-réaction de l'amplificateur opérationnel
- $V_c =$ tension à travers la capacité de contre-réaction

Les tensions d'entrée et de sortie, V_e and V_s sont liées par l'équation

$$V_s = -A V_e$$

Par ailleurs, V_c peut être facilement calculé puisque

$$V_c = V_s - V_e = V_s - \frac{V_s}{-A} = \left(1 + \frac{1}{A}\right) V_s$$

Un amplificateur idéal possède un courant d'entrée nul. La loi de Kirchoff s'applique aux courants indiqués Fig. 3.3.

$$I + I_i + I_c = 0$$

Ces courants peuvent être définis par d'autres paramètres propres au circuit. I dépend de la charge produite par les éléments piézoélectriques.

$$I = \frac{dQ_a}{dt}$$

$$I_c = C_{cr} \frac{dV_c}{dt} = \left(1 + \frac{1}{A}\right) C_{cr} \frac{dV_s}{dt}$$

$$I_i = -C_t \frac{dV_e}{dt} = \frac{1}{A} C_t \frac{dV_s}{dt}$$

En substituant ces expressions dans l'équation de Kirchhoff, on obtient le courant issu de l'accéléromètre

$$\frac{dQ_a}{dt} = -\left(1 + \frac{1}{A}\right) C_{cr} \frac{dV_s}{dt} - \frac{1}{A} C_t \frac{dV_s}{dt}$$

Cette équation se résout par intégration. Les constantes correspondant à toute tension de décalage DC initialement présente à la sortie de l'amplificateur sont supposées nulles. De tels décalages disparaîtront rapidement pendant l'utilisation du préamplificateur. La solution de l'équation est donc

$$V_s = -\frac{Q_a}{\left(1 + \frac{1}{A}\right) C_{cr} + \frac{1}{A} C_t} \quad (1)$$

Lorsque l'amplitude de A est prise en considération ($\approx 10^5$), l'équation se simplifie encore

$$V_s = -\frac{Q_a}{C_{cr}} \quad (2)$$

Il devient clair que la tension de sortie est proportionnelle à la charge d'entrée et donc à l'accélération de l'accéléromètre. Le gain du préamplificateur est déterminé par la capacité de contre-réaction.

La capacité d'entrée n'a aucune influence sur la tension de sortie car dans le cas idéal ($A \rightarrow \infty$), la tension d'entrée est nulle.

$$V_e = -\frac{V_s}{A} = 0$$

Par conséquent, la résistance d'entrée finie n'a aucun effet sur la tension de sortie. Ceci veut dire que seuls les courants issus de l'accéléromètre et du condensateur de contre-réaction circulent au point d'entrée. Ces courants sont de même amplitude mais de polarité différente. Il est maintenant évident que toutes les charges circulent de l'accéléromètre vers le condensateur de contre-réaction.

On a suffisamment parlé des modèles simples. Qu'en est-il des modèles réels dans lesquels on tient compte de R_a , R_b et R_p ? Un modèle de ce genre est montré Fig. 3.4, mettant en évidence les résistances et les capacités équivalentes, R_i et C_n , à l'entrée. Ce circuit comprend maintenant tous les éléments présents dans la Fig. 3.2. Les équations deviennent

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b} + \frac{1}{R_p}$$

$$V_s = -AV_e$$

$$V_c = \left(1 + \frac{1}{A}\right) V_s$$

$$I_c = C_{cr} \frac{dV_c}{dt} + \frac{V_c}{R_{cr}}$$

$$= \left(1 + \frac{1}{A}\right) \left[C_{cr} \frac{dV_s}{dt} + \frac{V_s}{R_{cr}} \right]$$

$$I_l = -C_t \frac{dV_e}{dt} - \frac{V_e}{R_t} = \frac{1}{A} \left[C_t \frac{dV_s}{dt} + \frac{V_s}{R_t} \right]$$

$$\frac{dQ_a}{dt} = - \left(1 + \frac{1}{A}\right) \left[C_{cr} \frac{dV_s}{dt} + \frac{V_s}{R_{cr}} \right] - \frac{1}{A} \left[C_t \frac{dV_s}{dt} + \frac{V_s}{R_t} \right]$$

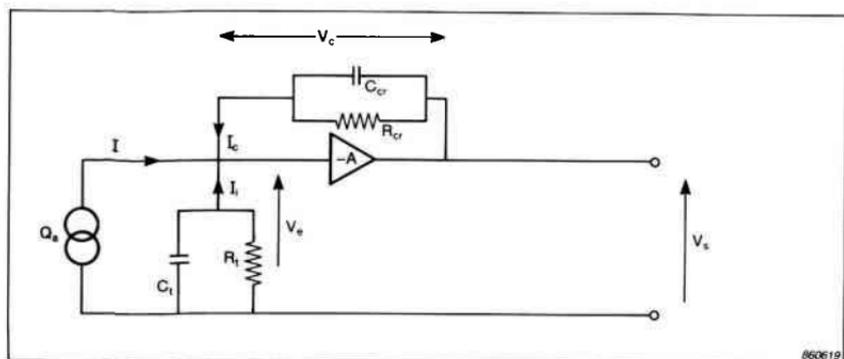


Fig. 3.4. Circuit équivalent d'un accéléromètre connecté à un préamplificateur de charge

Cette équation ne se résout pas par simple intégration comme pour le modèle précédent. Cependant, en supposant que les tensions et les courants varient harmoniquement avec le temps, on peut obtenir une solution. Encore une fois, les termes DC et les conditions initiales, qui disparaissent rapidement, peuvent être ignorés dans l'analyse. L'équation devient alors

$$j\omega Q_a = - \left(1 + \frac{1}{A}\right) \left[j\omega V_s C_{cr} + \frac{V_s}{R_{cr}} \right] - \frac{1}{A} \left[j\omega V_s C_t + \frac{V_s}{R_t} \right]$$

d'où la tension de sortie, V_s

$$V_s = - \frac{Q_a}{\left(1 + \frac{1}{A}\right) \left(C_{cr} + \frac{1}{j\omega R_{cr}}\right) + \frac{1}{A} \left(C_t + \frac{1}{j\omega R_t}\right)} \quad (3)$$

En supposant encore que A et R_{cr} soient très grands, la même relation qu'auparavant est obtenue

$$V_s = - \frac{Q_a}{C_{cr}} \quad (4)$$

Si R_{cr} est finie, l'expression peut être modifiée

$$V_s = - \frac{Q_a}{C_{cr} \left(1 + \frac{1}{j\omega R_{cr} C_{cr}}\right)} \quad (5)$$

Ainsi, Q_a étant proportionnel à l'accélération appliquée à l'accéléromètre, la sensibilité globale de la combinaison accéléromètre/préamplificateur peut être contrôlée en faisant varier C_{cr} . De plus, l'équation finale montre qu'en faisant varier la constante de temps de la boucle de contre-réaction, on contrôle la réponse du préamplificateur de charge en basse fréquence.

3.2.2. Limite basse fréquence

La réponse d'un préamplificateur de charge en basse fréquence est déterminée par la constante de temps imposée par le circuit de contre-réaction en parallèle avec l'amplificateur opérationnel. Elle n'est pas affectée par les variations de la charge d'entrée. On peut changer la limite BF en faisant varier la résistance de contre-réaction.

Les accéléromètres sont eux-même générateurs de charge et n'ont donc pas de réponses DC vraies. D'après les lois physiques fondamentales, il est évident que l'on n'obtient pas de puissance à partir d'un appareil sans puissance d'entrée. En outre, une force statique appliquée aux éléments piézoélectriques n'implique pas l'existence d'une puissance d'entrée.

Pour bien comprendre les possibilités des préamplificateurs de charge (et des préamplificateurs de tension) en basse fréquence, on doit avoir assimilé le fonctionnement des circuits RC simples.

Un condensateur emmagasine des charges. Sa capacité est définie par la quantité de charge conservée par unité de tension entre ses bornes. Les

équations suivantes définissent les relations entre la tension V , le courant I , la charge Q et la capacité C (d'un condensateur idéal ou, dans ce cas, des éléments piézoélectriques).

$$V = \frac{Q}{C}$$

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

$$I = C \frac{dV}{dt}$$

Si un condensateur idéal est chargé à une certaine tension, V_0 , la tension apparaissant entre ses bornes sera conservée. Ceci est dû au fait qu'un condensateur idéal possède une isolation parfaite en continu, c.-à-d. une résistance de fuite infinie, alors que celle d'un condensateur réel est finie. La charge conservée fuit et la tension chute exponentiellement à un rythme déterminé par la constante de temps du système, τ (voir Fig. 3.5).

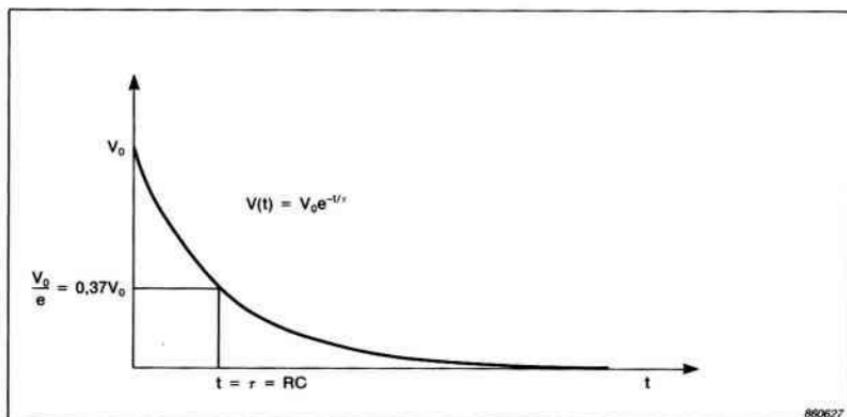


Fig. 3.5. L'amortissement exponentiel de la tension aux bornes d'un condensateur démontre le concept de « constante de temps », τ

Pour les mesures faites sur des signaux sinusoïdaux, la constante de temps τ a une signification particulière. Elle affecte les possibilités du système en basse fréquence. Si l'on représente la source de charge (éléments piézoélectriques) par plusieurs circuits RC, les résistances et capacités équivalentes sont celles visibles Fig. 3.6.

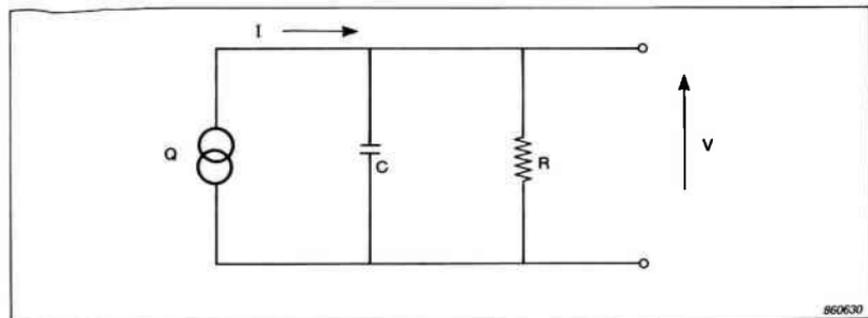


Fig. 3.6. Circuit équivalent d'un accéléromètre chargé par les capacité et résistance équivalentes du câble et du préamplificateur. Ce modèle est employé pour examiner les performances des préamplificateurs aux basses fréquences

En ayant recours aux définitions citées plus haut, l'équation du circuit s'écrit tout simplement

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{V}{R} + C \frac{dV}{dt}$$

Encore une fois, si les courants et tensions sont supposées être des fonctions harmoniques, l'expression suivante est obtenue

$$\begin{aligned} V &= \frac{Q}{\left(1 + \frac{1}{j\omega RC}\right) C} = \frac{Q}{\left(1 + \frac{1}{j\omega\tau}\right) C} \\ &= \frac{Q \left(1 + j\frac{1}{\omega\tau}\right)}{\left(1 + \frac{1}{\omega^2\tau^2}\right) C} \end{aligned}$$

Les valeurs DC et les conditions initiales ont été omises afin de rendre cette analyse plus simple. L'expression complexe montre que l'entrée a une amplitude $|V|$ et un angle de phase ϕ , définis par

$$\begin{aligned} \tan \phi &= \frac{1}{\omega\tau} \\ |V| &= \frac{Q \sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega\tau}\right)^2}}{\left(1 + \left(\frac{1}{\omega\tau}\right)^2\right) C} \end{aligned}$$

Lorsque $\omega\tau = 1$, $\tan \phi = 1$, $\phi = 45^\circ$ et $V = \frac{Q}{\sqrt{2} C}$

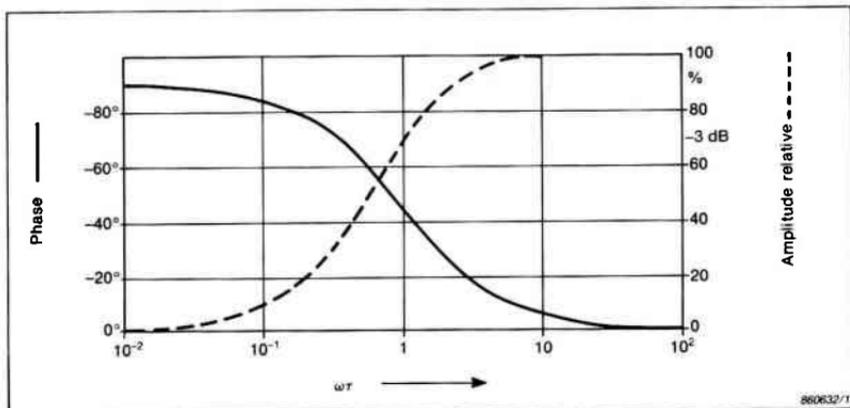


Fig. 3.7. Relations d'amplitude et de phase entre les tensions d'entrée et de sortie, en fonction de $\omega\tau$

La relation en phase et en amplitude entre les tensions d'entrée et de sortie, en fonction de $\omega\tau$, est visible Fig. 3.7. La fréquence correspondant à $\omega\tau = 1$ ($2\pi fRC = 1$) est:

$$f_b = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi\tau}$$

C'est ce qu'on appelle la limite basse fréquence (limite BF). Elle est caractérisée par une chute de 3dB du niveau de sortie, accompagnée par un déphasage de 45° .

Pour revenir aux préamplificateurs de charge, on remarque à partir de l'équation (3), paragraphe 3.2.1, que la limite BF est déterminée par la constante de temps du circuit de contre-réaction, c.-à-d. $\tau_{cr} = R_{cr}C_{cr}$. Le déphasage entre l'entrée et la sortie est normalement de -180° (inversion de phase), et à la limite BF, il est retardé de 45° supplémentaires. À partir de la même équation, on remarque aussi que la résistance d'entrée ne modifie pas la limite BF à moins qu'elle soit équivalente à R_{cr}/A . Ceci implique que, étant donnée une égalité entre C_{cr} et C_n , l'influence de la charge est réduite d'un facteur A par rapport au circuit RC simple discuté auparavant.

Exemple: Si une limite BF de 1 Hz est requise, quelle doit être la valeur de R_t ?

En supposant que A est environ 10^5 , et C_{cr} 1 nF, alors

$$R_{cr} = \frac{1}{2\pi C_{cr}}$$

$$R_t = \frac{1}{2\pi \cdot 10^5 \cdot 10^{-9}} = 1,6 \text{ k}\Omega$$

Cet exemple illustre l'immunité de la limite BF d'un préamplificateur de charge aux variations de la charge d'entrée. Il serait très difficile de réduire la valeur de la résistance équivalente de l'accéléromètre, des connecteurs et de l'entrée du préamplificateur à celle de cet exemple. Même une immersion totale de l'accéléromètre ne pourrait provoquer cela.

Les préamplificateurs de charge Brüel & Kjær offrent des limites BF aussi basses que des fractions de hertz. Des possibilités en basse fréquence sont nécessaires pour la mesure d'impulsions de longues durées et de vibrations quasi-statiques. Toutefois, de telles mesures ne sont rendues possibles que par le recours aux accéléromètres à Cisaillement en delta[®]. En effet, avec les autres types d'accéléromètres, ces bruits basse fréquence induits par l'environnement masquent la sortie.

3.2.3. Charge capacitive d'entrée due aux câbles d'accéléromètres

La sensibilité d'un préamplificateur de charge n'est pas sérieusement affectée par les variations de capacité provoquées par les changements des longueurs de câble. Lorsque de très longs câbles sont utilisés, la réponse en haute fréquence est légèrement atténuée.

On a déjà montré que la sortie d'un préamplificateur de charge est déterminée uniquement par la capacité de contre-réaction, C_{cr} , et par la charge produite par les éléments sensibles, Q_a . Dans un préamplificateur de charge, C_{cr} a une valeur typique de 1 nF, donnant une sensibilité de sortie de 1 mV/pC. Elle ne change que si C_t devient de l'ordre de grandeur de AC_{cr} . L'exemple suivant démontre l'immunité d'un préamplificateur de charge aux variations de la capacité du câble.

Exemple: Quelle est la longueur de câble maximale permise afin que la sensibilité de l'ensemble «accéléromètre-préamplificateur» ne varie pas de plus de 1%?

En supposant que C_{cr} et C_a valent 1 nF et que A soit 10^5 , alors, à partir de l'équation (1) paragraphe 3.2.1

$$V_s = - \frac{Q_a}{\left(1 + \frac{1}{A}\right) C_{cr} + \frac{1}{A} C_t}$$

$$C_t = 0,01 (A + 1) C_{cr} = 0,01 (10^5 + 1) 1 \text{ nF} = 10^3 \text{ nF} = 1 \mu\text{F}$$

Cette capacité correspond à 10000 m de câble à raison de 100 pF/m.

Une grande charge capacitive à l'entrée du préamplificateur peut légèrement affecter ses possibilités en haute fréquence. Ceci est dû au fait que le gain des amplificateurs opérationnels décroît en haute fréquence. Par conséquent, la supposition que A soit infini dans l'analyse menant à la définition de la sensibilité en charge, est moins précise. La sortie du préamplificateur de charge est réduite comme le montre l'équation de la tension de sortie obtenue plus haut

$$V_s = - \frac{Q_a}{\left(1 + \frac{1}{A}\right) \left(C_\alpha + \frac{1}{j\omega R_\alpha}\right) + \frac{1}{A} \left(C_t + \frac{1}{j\omega R_t}\right)}$$

Exemple: On suppose que le gain A est réduit à 10^3 en haute fréquence et que la capacité de contre-réaction C_α est de 1 nF. Il existe une charge d'entrée de 20 nF correspondant à 200 m de câble à raison de 100 pF/m. Cette charge contribue à une réduction de la sensibilité de 5%. Cet effet n'est normalement d'aucune importance.

La Fig. 3.8 montre comment une augmentation de la capacité d'entrée engendrée par l'emploi de très longs câbles affecte la réponse en haute fréquence des préamplificateurs de charge Brüel & Kjær. Pour les cas particuliers, consulter les Manuels d'instruction.

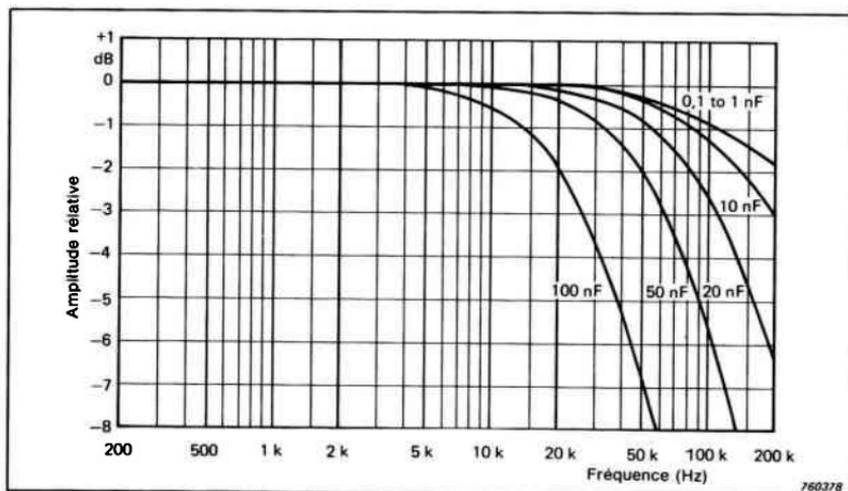


Fig. 3.8. Influence de la capacité de charge à l'entrée sur la réponse en haute fréquence d'un préamplificateur de charge Brüel & Kjær

3.2.4. Atténuation de la charge

Bien que l'addition d'une autre capacité en parallèle n'ait qu'une influence négligeable sur la sensibilité en charge, celle d'une capacité en série réduit la charge de sortie effective du capteur. Ceci est parfois désirable lors de mesures de vibrations de hauts niveaux avec un accéléromètre de haute sensibilité. L'entrée du préamplificateur peut être saturée à cause de la grande charge. En ajoutant des capacités calibrées et soigneusement choisies, en série et en parallèle avec l'accéléromètre, la charge d'entrée peut être atténuée (voir Fig. 3.9).

D'autre part, des atténuateurs de charge «tout faits» sont disponibles chez Brüel & Kjær. On les trouve sous les numéros de référence WB 0726* et WB 0778*. Ils donnent une atténuation de 20 dB et 12 dB respectivement.

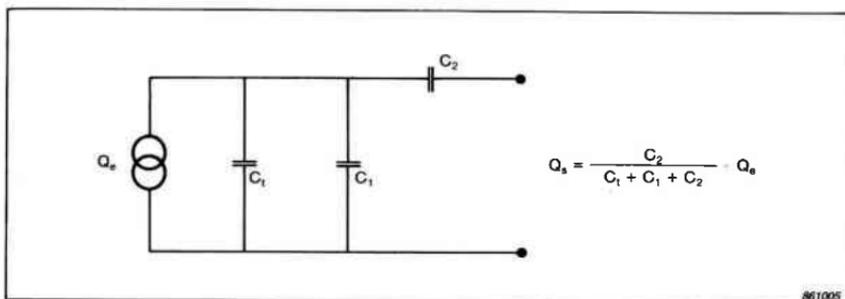


Fig. 3.9. Schéma de principe d'un atténuateur de charge

3.2.5. Le bruit dans les préamplificateurs de charge

L'utilisation de très longs câbles d'accéléromètre et de montages à gain faible fait augmenter le niveau de bruit dans le préamplificateur de charge et donc décroître le rapport signal/bruit de la mesure.

Si la charge résistive d'entrée chute, le bruit augmente.

Un exemple de source de bruit interne d'un amplificateur opérationnel est illustré Fig. 3.10. Ce modèle exclut les effets de bruit externes tels les effets tribo-électriques des câbles, les tensions de boucle de masse et les parasites électromagnétiques. Ces cas seront examinés paragraphe 3.6.

* Ces articles sont développés par le groupe d'Ingénierie de systèmes de Brüel & Kjær, et ne sont pas des articles de production standard. Voir votre représentant local.

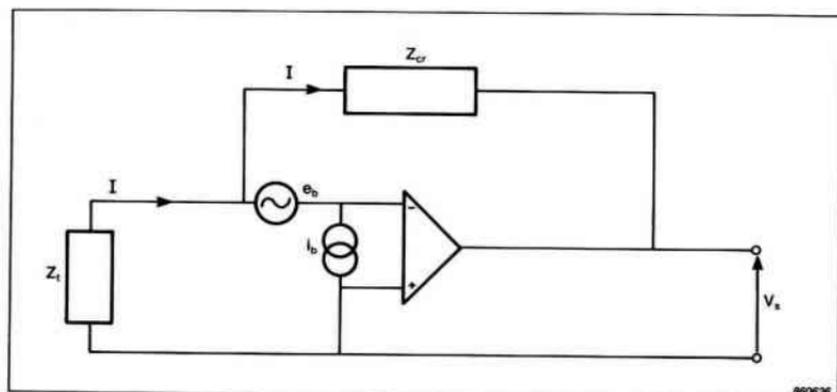


Fig. 3.10. Circuit équivalent d'un accéléromètre connecté à un préamplificateur de charge. Toutes les sources de bruit au sein du préamplificateur sont représentées par une source de tension et une source de courant à l'entrée

- Z_t = impédance équivalente de l'accéléromètre et du câble
 Z_{cr} = impédance équivalente de la boucle de contre-réaction
 e_b = tension liée au bruit
 i_b = courant lié au bruit
 V_s = tension de sortie

Dans le cas d'une grande impédance de source (éléments piézoélectriques) et d'une contre-réaction de nature principalement capacitive, le courant lié au bruit est négligeable. Comme dans le paragraphe 3.2.1, il y a en fait une masse virtuelle à l'entrée inverseuse de l'amplificateur opérationnel et aucun courant n'y circule. Ainsi,

$$I = \frac{-e_b}{Z_t} = \frac{e_b - V_s}{Z_{cr}}$$

$$V_s = e_b \left(1 + \frac{Z_{cr}}{Z_t} \right)$$

Pour convertir ceci en une expression du signal à la source, on doit diviser par le facteur d'amplification, Z_{cr} / Z_t

$$\begin{aligned}
 e_s &= -V_s \frac{Z_t}{Z_{cr}} \\
 &= -e_b \left(1 + \frac{Z_t}{Z_{cr}} \right)
 \end{aligned}$$

Vers le milieu de la gamme fréquentielle utile, les impédances à la source et à la sortie sont toutes deux principalement capacitives. Donc

$$\frac{Z_t}{Z_{cr}} = \frac{C_{cr}}{C_t}$$

où

$$C_t = C_a + C_c + C_p$$

$$e_s = -e_b \left(1 + \frac{C_{cr}}{C_t} \right)$$

De plus, ceci peut être converti en un bruit de charge équivalent, q_t , au niveau de la capacité de source C_p , en multipliant par C_t .

$$q_t = e_s \cdot C_t = -e_b (C_t + C_{cr})$$

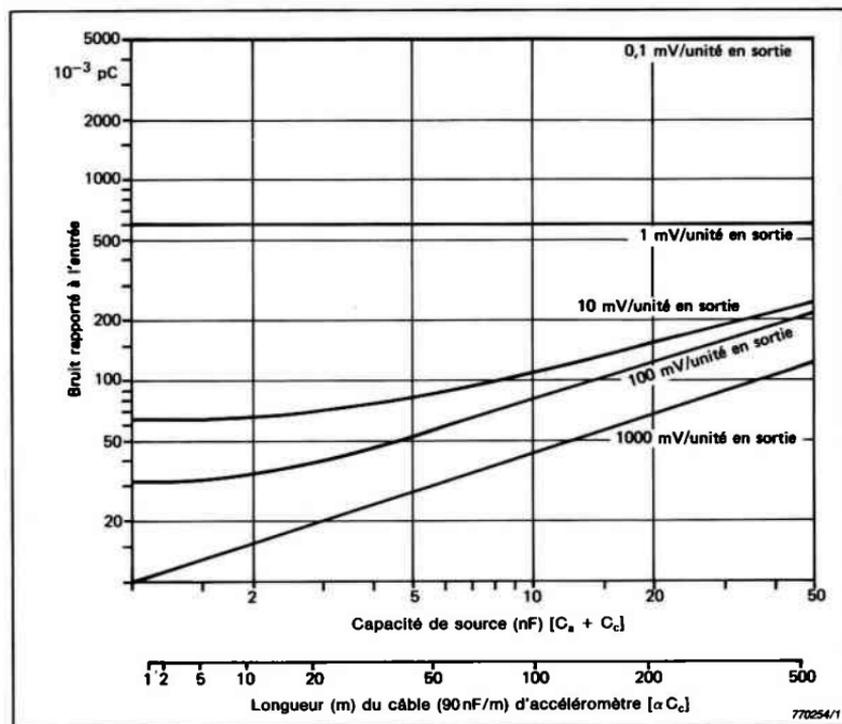


Fig. 3.11. Bruit de bande large (2 Hz à 100 kHz) d'un préamplificateur de charge Brüel & Kjær, en fonction de la capacité d'entrée

À partir de ces résultats, on peut voir que bien que la sensibilité et la limite BF ne soient pas très affectées par une charge d'entrée résistive ou capacitive, le bruit de charge augmente quand même lorsque C_i et C_{cr} augmentent. Une petite diminution du rapport signal/bruit est donc inévitable lors de la connexion de très longs câbles à l'entrée. La Fig. 3.11 illustre la dépendance du niveau de bruit à l'entrée vis-à-vis de la capacité à l'entrée d'un préamplificateur de charge Brüel & Kjær. D'autres préamplificateurs montrent une dépendance similaire.

Comme C_{cr} détermine le gain du préamplificateur, on aura plus de bruit à des réglages plus bas demandant une plus grande capacité de contre-réaction. L'emploi d'un accéléromètre à haut gain donne un meilleur rapport signal/bruit.

On doit se rappeler que le câble lui-même tend à produire un bruit lorsqu'exposé à des vibrations mécaniques. À cet effet, les câbles Brüel & Kjær à faible bruit doivent être utilisés. Ceci est particulièrement justifié lors des mesures de faibles niveaux. Ces câbles doivent être soigneusement fixés. Voir paragraphe 4.6.

En basse fréquence (<100 Hz), le bruit lié au préamplificateur augmente d'une façon inversement proportionnelle à la fréquence. C'est là une propriété des amplificateurs opérationnels, et ce bruit est réduit par l'utilisation d'un filtre passe-haut. La Fig. 3.12 illustre une analyse en 1/3 d'octave, du bruit engendré par un préamplificateur de charge Brüel & Kjær.

Si la charge résistive d'entrée chutait en dessous de $10\text{ M}\Omega$, le bruit issu du préamplificateur de charge commencerait à augmenter, les changements les

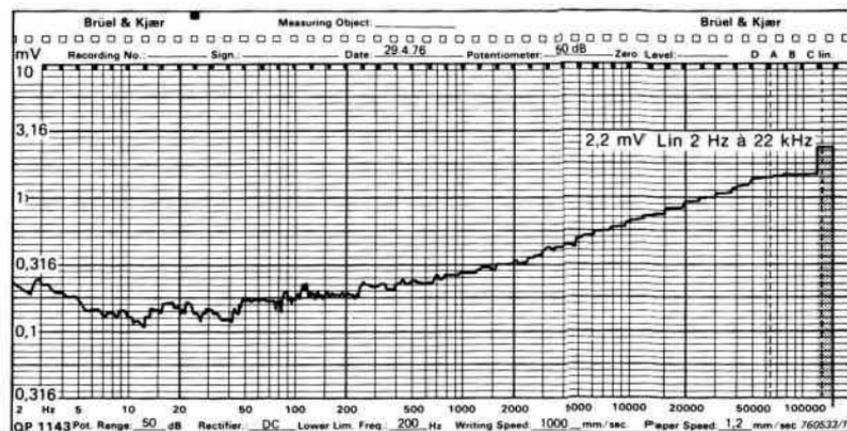


Fig. 3.12. Analyse en 1/3 d'octave du bruit produit par un préamplificateur de charge Brüel & Kjær

plus importants se produisant en basse fréquence. Cependant, toute analyse des sources de bruit demande une connaissance détaillée des composants à l'entrée et de leur couplage. La Fig. 3.13 montre une relation obtenue expérimentalement entre le bruit de bande étroite du préamplificateur et la résistance d'entrée. Le bruit est exprimé en volts par racine carrée de largeur de bande du filtre.

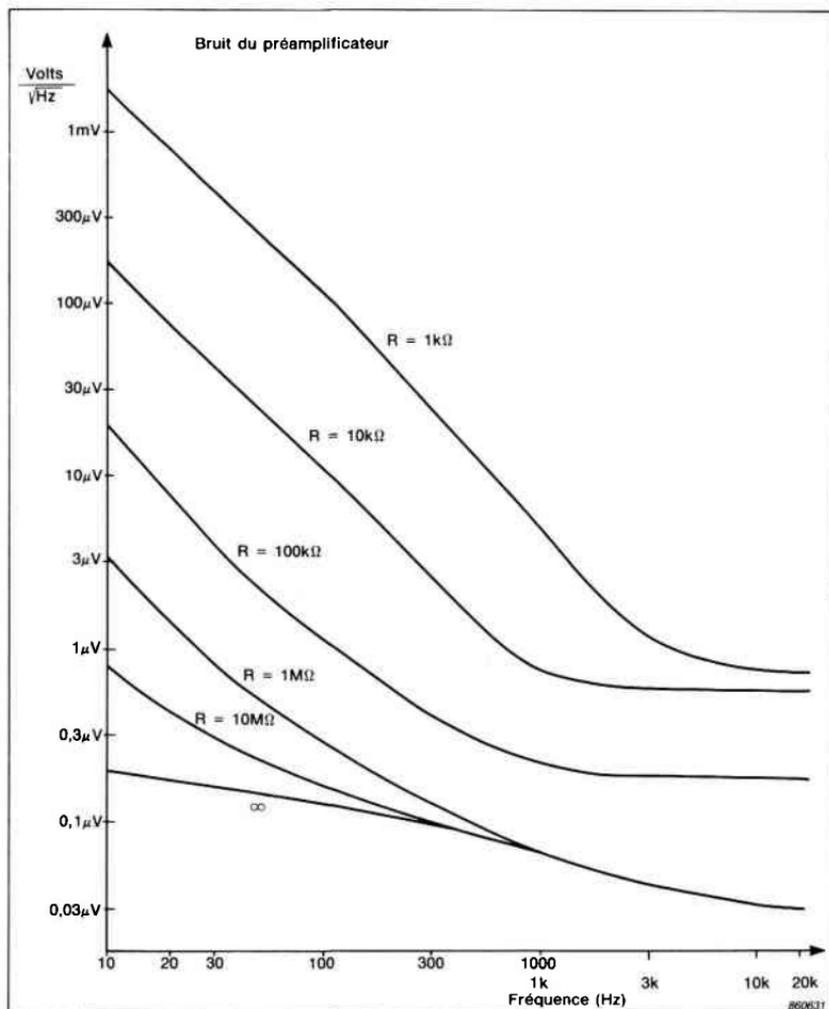


Fig. 3.13. Relation entre la résistance d'entrée et le bruit pour un préamplificateur de charge

3.3. PRÉAMPLIFICATEURS DE TENSION

La tension de sortie d'un préamplificateur de tension est proportionnelle à la tension d'entrée; l'accéléromètre est ainsi perçu comme une source de tension. Les variations de la capacité du câble impliquent des variations de la sensibilité globale. Toute variation de la résistance d'entrée peut affecter la performance de l'accéléromètre en basse fréquence.

Un préamplificateur de tension détecte aux bornes de la capacité de l'accéléromètre les variations de tension dues aux vibrations, et produit une tension de sortie proportionnelle. Les préamplificateurs de tension sont plus simples de par leur conception mais ne sont pas pour autant meilleurs que les préamplificateurs de charge. Puisque Brüel & Kjær ne produit qu'un seul préamplificateur ayant l'option de tension d'entrée, les détails relatifs à son fonctionnement seront limités.

3.3.1. Sensibilité en tension

La Fig. 3.14 illustre le circuit équivalent d'un accéléromètre relié à un préamplificateur de tension. En comparant ce circuit avec celui de la Fig. 3.2, on peut constater que mise à part la connexion de l'amplificateur opérationnel, ils sont identiques. L'amplificateur opérationnel se conduit comme un adaptateur d'impédance de gain égal à 1 ($V_s = V_e$). La très grande impédance d'entrée est représentée par C_p et R_p . La nomenclature est la même que pour les Figs. 3.2 et 3.3.

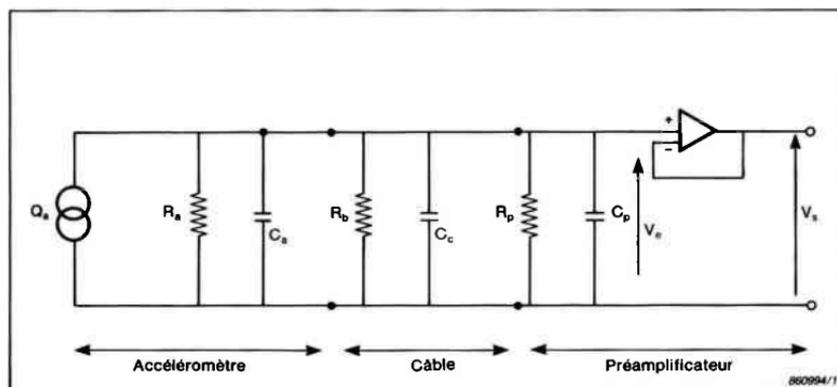


Fig. 3.14. Circuit équivalent d'un préamplificateur de tension utilisant un accéléromètre piézoélectrique comme source de tension

Dans la Fig. 2.8, on a démontré qu'en boucle ouverte (ni câble ni préamplificateur), l'accéléromètre produisait une tension de sortie V_a équivalente à

$$V_a = \frac{Q_a}{C_a}$$

R_a est une très grande résistance en parallèle et est donc ignorée. D'après le paragraphe 3.2.2, la tension d'entrée du préamplificateur s'exprime ainsi

$$V_e = \frac{Q_a}{C_a + C_c + C_p}$$

et donc

$$V_s = V_e = V_a \frac{C_a}{C_a + C_c + C_p}$$

Cette expression s'exprime en fonction de la sensibilité en charge S_{qa} ($\mu\text{C}/\text{ms}^{-2}$) et de la sensibilité en tension S_{va} (mV/ms^{-2})

$$\begin{aligned} S_{va} &= \frac{S_{qa}}{C_a + C_c + C_p} \\ &= S_{va(b. ouverte)} \frac{C_a}{C_a + C_c + C_p} \end{aligned}$$

où $S_{va(b. ouverte)}$ est la sensibilité en tension de l'accéléromètre *boucle ouverte*.

Puisque S_{qa} et C_a sont des constantes propres à l'accéléromètre, S_{va} dépend de la capacité du câble. Voilà une situation indésirable car, si les sensibilités en tension et préamplificateurs de tensions spécifiés sont utilisés, un accéléromètre ne peut être employé qu'avec le câble avec lequel il a été étalonné. Si celui-ci était remplacé par un autre, un nouvel étalonnage s'imposerait.

Exemple. Lors de mesures de vibrations, le besoin d'un câble plus long et plus solide s'est fait ressentir. Le câble à remplacer est un Câble AO 0038 de 1,2 m de long, et le substitut convenable serait un Câble renforcé AO 0122 de 3 m de long. Quelle serait la nouvelle sensibilité en tension pour cette combinaison?

Capacité typique du Câble AO 0038 = 110 pF

Capacité de l'accéléromètre (câble inclus) = 1117 pF

Sensibilité en charge = 9,8 $\mu\text{C}/\text{ms}^{-2}$

Sensibilité en tension = 8,76 mV/ms^{-2}

À partir de ces données, on est en mesure de calculer la capacité C_a de l'élément piézoélectrique (accéléromètre sans câble):

$$C_a = 1007 \text{ pF}$$

La capacité typique C_c du Câble AO 0122 est de 260 pF. La nouvelle sensibilité en tension est donc

$$S_{va} = \frac{9,8 \cdot 10^{-12}}{(1007 \cdot 10^{-12}) + (260 \cdot 10^{-12})}$$

$$= 7,73 \text{ mV/ms}^{-2}$$

La sensibilité en tension a diminué de 11% par simple substitution du câble.

Cette dépendance de la sensibilité vis-à-vis de la capacité d'entrée n'est pas simplement un inconvénient lors de l'emploi de plusieurs câbles, mais elle implique aussi que le rapport signal/bruit diminue avec des câbles plus longs. Si ceux-ci étaient extrêmement longs, seule une fraction infime de la tension boucle ouverte serait présente à l'entrée du préamplificateur.

3.3.2. Limite basse fréquence

L'analyse des possibilités en basse fréquence présentée paragraphe 3.2.2 peut être réutilisée pour démontrer que la limite BF à -3dB s'exprime de la manière suivante

$$f_b = \frac{1}{2\pi R_i C_t}$$

où

$$C_t = C_a + C_c + C_p$$

$$\frac{1}{R_i} = \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b} + \frac{1}{R_p}$$

Pour s'assurer que la limite BF est assez bonne pour permettre un fonctionnement utile à des fréquences de 1 Hz ou moins, le produit RC (constante de temps) doit être très grand. Théoriquement, il y a deux façons d'y parvenir;

1. Avoir une capacité totale aussi grande que possible. Puisque C_a est une constante propre à l'accéléromètre, C_c doit être augmenté en rajoutant du câble. Cette solution n'est pas pratique car elle entraîne une diminution de la sensibilité en tension et une compression de la gamme dynamique.
2. Concevoir un préamplificateur doté d'une grande résistance d'entrée. C'est là ce qu'on fait avec les préamplificateurs de tension. Cependant, si pour une raison ou une autre, la résistance d'entrée était réduite, la limite BF serait plus élevée. Ceci arrive, par exemple, lorsque la connexion de sortie de l'accéléromètre est humide. La résistance de fuite diminue et ce shunt à l'entrée fait décroître la résistance d'entrée.

3.3.3. Bruit lié aux préamplificateurs de tension

Contrairement au bruit produit par les préamplificateurs de charge, celui produit par les préamplificateurs de tension est indépendant de la capacité d'entrée. Ainsi, les choix de gain et de longueur de câble n'ont aucun effet sur le bruit à l'entrée. Cependant, il n'est pas question d'amélioration car le rapport signal/bruit empire avec la diminution de la sensibilité en tension due à une plus grande longueur de câble.

3.4. Câbles de sortie du préamplificateur

Dans le cas d'emploi de préamplificateurs de charge ou de tension, il s'avère crucial que ceux-ci puissent fournir un courant de sortie suffisamment grand pour qu'un instrument de mesure puisse afficher une valeur. La tension nécessaire est obtenue à la sortie de l'amplificateur opérationnel et est appliquée à travers l'impédance du câble.

Lorsqu'une grande charge capacitive est présente à la sortie du préamplificateur, la valeur de crête maximale de la tension de sortie peut être limitée. Ceci devient un problème lorsque de longs câbles et des performances en haute fréquence sont requis. Par exemple, à 10 kHz, une telle limitation peut se manifester dès que la charge excède 20 nF (correspondant à un câble de 200 m à raison de 100 pF/m). Voir Fig. 3.15.

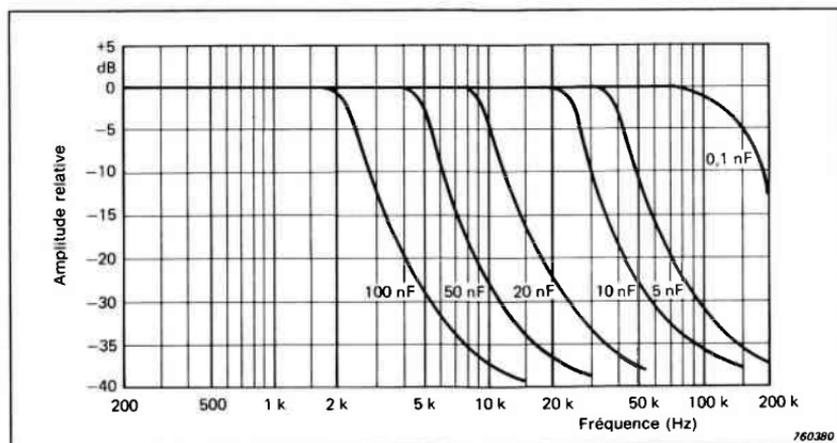


Fig. 3.15. Influence typique de la capacité de charge à la sortie sur la réponse en haute fréquence d'un préamplificateur de charge Brüel & Kjær

Dans certains cas, cette limitation est directement liée à la la sortie maximale du préamplificateur. Si le courant de sortie maximal est de 8 mA (valeur typique), et la charge de 20 nF, une impédance d'environ 796Ω à 10 kHz est obtenue, et une tension de crête égale à 6,37 V en résulte. Par conséquent, si le niveau vibratoire et les sensibilités de l'accéléromètre et du préamplificateur devaient produire une plus grande sortie, une atténuation aurait lieu. L'influence de la capacité des câbles sur la réponse en haute fréquence d'un préamplificateur de charge Brüel & Kjær est illustrée Fig. 3.15.

3.5 SYSTÈMES LINE-DRIVE

Un amplificateur Line-Drive est essentiellement le premier étage d'un préamplificateur de charge ou de tension, qui peut être incorporé à un accéléromètre. La gamme d'accéléromètres Line-Drive de Brüel & Kjær est illustrée Fig. 3.16. Il existe aussi un amplificateur Line-Drive séparé qu'on peut monter directement sur un accéléromètre d'usage général ou à courte distance de celui-ci. L'utilisation à distance de l'Amplificateur Line-Drive Type 2644 présente l'avantage de pouvoir mesurer de plus hauts niveaux de vibrations, et à des températures plus élevées, qu'avec un amplificateur Line-Drive incorporé ou monté sur accéléromètre. L'Amplificateur Line-Drive Type 2644 de Brüel & Kjær est visible Fig. 3.17.

L'alimentation d'un système Line-Drive doit être dérivée d'une source Line-Drive externe. Pour alimenter les accéléromètres et préamplificateurs Line-Drive Brüel & Kjær, on a recours à l'Alimentation Line-Drive Type 2813. Celle-ci alimentée sur piles et est capable à son tour d'alimenter simultanément deux

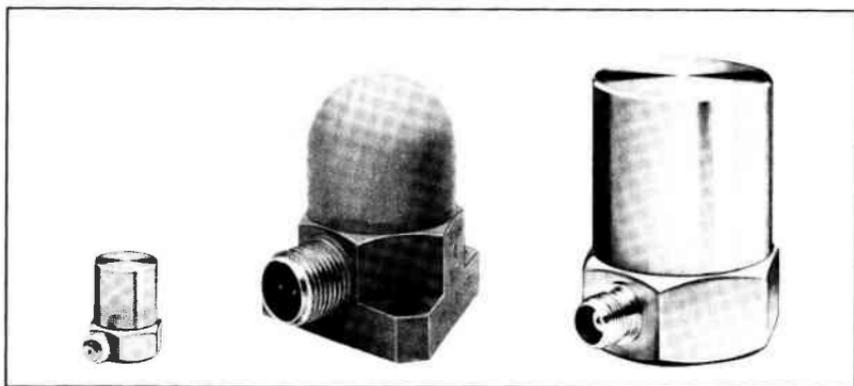


Fig. 3.16. Accéléromètres Line-drive de Brüel & Kjær (gauche à droite) Types 4390, 8317 et 8318. Les échelles des photographies sont 1/1, 1/1 et 1/2 respectivement



Fig. 3.17. Montage de l'Amplificateur Line-drive Type 2644 sur un accéléromètre

accéléromètres Line-Drive. Le 2813 est montré Fig. 3.18. Sa tension de sortie est reliée à l'entrée des instruments de mesure et d'analyse. Une source Line-Drive similaire est incorporée à plusieurs analyseurs de vibrations et de signaux Brüel & Kjær.

L'incorporation de préamplificateurs aux accéléromètres n'est pas une technique tout à fait récente. Les premiers systèmes de ce genre ont été conçus dans le but d'améliorer les possibilités des accéléromètres de très petite capacité et de faible sensibilité, et employaient le quartz comme élément piézoélectrique. De tels accéléromètres étaient très sensibles au bruit généré ou capté par les câbles (bruits tribo-électrique et électromagnétique).

Bien que les accéléromètres plus récents emploient des céramiques piézoélectriques et des câbles pour capteurs à faible bruit, il est toujours avantageux d'utiliser des préamplificateurs incorporés, ou des préamplificateurs Line-Drive

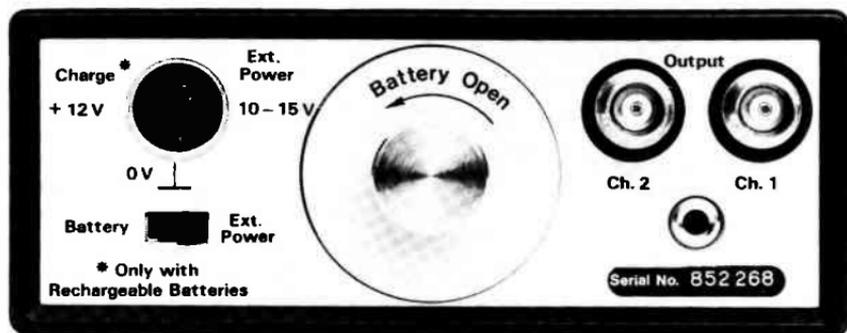


Fig. 3.18. Alimentation Line-drive à 2 voies Type 2813

montés près des accéléromètres, dans les environnements potentiellement «bruités». Les préamplificateurs Line-Drive sont donc souvent utilisés pour les mesures en milieux industriels. Dans ce cas, ils ont l'avantage de transmettre des signaux de faible impédance le long de câbles extrêmement longs et peu coûteux. La sensibilité d'un tel système à une combinaison de tensions de boucle de masse et de bruit de câble est plus faible que celle de tout autre préamplificateur de vibration (voir paragraphe 3.6).

Dans le passé, les possibilités de certains modèles Line-Drive souffraient de l'inadéquation de leur circuits électroniques intégrés. Cependant, avec les progrès réalisés au niveau des techniques de circuit à couche épaisse employées chez Brüel & Kjær, des préamplificateurs de haute qualité et dont les possibilités sont très grandes sont incorporés aux accéléromètres.

Néanmoins, l'électronique intégrée aux accéléromètres restreint les gammes dynamiques et thermiques de ceux-ci. Il en est de même pour les préamplificateurs Line-Drive montés sur accéléromètres. La masse additionnelle d'un préamplificateur doit aussi être prise en considération lors de mesures sur des structures légères.

Des conceptions Line-Drive diverses ont été utilisées jusqu'ici, mais aujourd'hui la presque totalité des systèmes fait appel aux câbles à deux fils pour relier le préamplificateur à la source d'alimentation. Celle-ci est soit une source de courant constant, soit une source de tension constante. Les deux systèmes ne sont pas interchangeables. Le système Line-Drive de Brüel & Kjær utilise une source de tension constante, et le courant modulé de la source d'alimentation permet la transmission des signaux vibratoires. On démontrera que ce système a de meilleures possibilités que celui utilisant une source de courant constant.

3.5.1. Accéléromètres et sources Line-Drive de Brüel & Kjær

La sensibilité d'un accéléromètre Line-Drive s'exprime en termes de sensibilité en courant ($\mu\text{A}/\text{ms}^{-2}$) à la sortie de son amplificateur Line-Drive incorporé. La sensibilité finale à la sortie de la source d'alimentation s'obtient par simple multiplication de cette sensibilité par celle propre à la source d'alimentation ($\text{mV}/\mu\text{A}$), pour obtenir des mV/ms^{-2} .

Par exemple, un accéléromètre Line-Drive d'une sensibilité de $3,16 \mu\text{A}/\text{ms}^{-2}$ relié à une Alimentation Line-Drive Type 2813 donne une sensibilité globale de $3,16 \text{mV}/\text{ms}^{-2}$.

3.5.2. Amplificateurs et sources Line-Drive de Brüel & Kjær

La sensibilité en charge de l'accéléromètre (pC/ms^{-2}) est initialement convertie en une sensibilité en courant ($\mu\text{A}/\text{ms}^{-2}$) à la sortie du 2644, à l'aide de la sensibilité de ce même amplificateur Line-Drive ($\mu\text{A}/\text{pC}$). Alors, le procédé continue tout comme dans le dernier paragraphe, par la multiplication de la sortie du 2644 par la sensibilité à la sortie de la source d'alimentation, pour obtenir des mV/ms^{-2} .

Par exemple, lorsqu'un accéléromètre d'une sensibilité de $3,16 \text{pC}/\text{ms}^{-2}$ est utilisé avec un 2644 et un 2813, on obtient la même sensibilité que dans l'exemple précédent, c.-à-d. $3,16 \text{mV}/\text{ms}^{-2}$.

3.6. COMPARAISON DES SENSIBILITÉS DE DIVERS SYSTÈMES AUX SOURCES DE BRUIT EXTERNES

Dans les montages de mesure multivoies où les boucles de masse et les longs câbles sont souvent des sources de problèmes, il est important de connaître la sensibilité relative des systèmes de mesure au bruit externe, et de choisir le système le plus approprié pour cet environnement.

Les systèmes suivants sont comparés.

1. Accéléromètre relié à la masse, avec préamplificateur de charge.
2. Accéléromètre relié à la masse, avec préamplificateur de charge doté d'une entrée flottante.
3. Système Line-Drive de Brüel & Kjær, utilisant une source de tension constante et un courant modulé.
4. Système Line-Drive de Brüel & Kjær, utilisant une source de tension constante, un courant modulé et une entrée flottante.

5. Système Line-Drive de tension, utilisant une source de courant constant (non fournie par Brüel & Kjær).
6. Accéléromètre à sortie bipolaire utilisant un préamplificateur de charge différentiel.

En plus de ces systèmes, on examinera l'avantage du recours à la technique de montage isolé (par ex. rondelle de mica), ou aux accéléromètres avec base électriquement isolée.

Dans l'analyse suivante (paragraphe 3.6.1 à 3.6.7), le bruit à l'entrée est supposé être causé par la combinaison de deux effets.

1. **Effet tribo-électrique.** Si leurs mouvements ne sont pas restreints, tous les câbles coaxiaux produisent une charge. Ce phénomène devient plus évident si le câble n'est pas à faible bruit et n'est pas fixé à même la surface vibrante. Pour pouvoir comparer les résultats de l'analyse, nous considérons que cet effet donne naissance à un bruit de charge q_b de 100 pC, dans chacun des cas ci-dessous. Dans cette analyse, l'effet tribo-électrique peut être perçu comme une source de charge idéale.

Note: Une charge tribo-électrique de 100 pC est un cas extrême.

2. **Boucles de masse.** Avec les grandes machines, il y a toujours le risque que leurs bâtis ne soient pas reliés à la masse. Par conséquent, le boîtier de l'accéléromètre et le blindage de son câble ne sont pas à la masse, et une chute de tension se produit le long du câble. Dans la perspective de comparer les résultats obtenus par l'analyse, cette tension e_b sera supposée être de 1 V.

En addition à ces deux phénomènes, les interférences électromagnétiques (IEM) peuvent contribuer au bruit affectant le système. La proximité des circuits de puissance aux systèmes transporteurs de petits signaux de grande impédance est un exemple de traitement inadéquat des IEM. Une autre situation typique est celle des câbles d'alimentation parallèles aux câbles de signaux sur de longues distances. Les signaux de bruit résultants peuvent être séparés en signaux capacitivement couplés et en d'autres inductivement couplés. Les systèmes Line-Drive sont moins sensibles à ce genre d'IEM que les systèmes de charge, aux fréquences normales des câbles d'alimentation.

Le couplage inductif est souvent possible dès lors que les câbles d'accéléromètres sont à proximité des câbles porteurs de courant alternatif de grande intensité. Le couplage augmente avec la fréquence. Les courants de fuite issus des circuits à commutation rapide et d'autres courants de haute fréquence sont souvent à l'origine des interférences électromagnétiques. On peut avoir recours aux écrans magnétiques pour minimiser les effets de ce genre d'IEM. Les

paires de câbles torsadés sont encore plus insensibles à ces effets car le flux total est presque nul.

Le bruit dû aux interférences électromagnétiques est normalement d'une amplitude incomparable à celle du bruit dû aux boucles de masse. Les paramètres de couplage typiques sont difficiles à définir. Par conséquent, on ne considèrera dans les cas suivants que les bruits dus aux effets tribo-électriques et aux boucles de masse.

Dans tous les cas suivants, le bruit est référé à l'entrée du dernier instrument de la chaîne de mesure, et s'exprime en fonction de paramètres appropriés (par ex., charge équivalente pour un préamplificateur de charge, courant équivalent pour une source d'alimentation Line-Drive en tension constante, et tension équivalente pour une source d'alimentation Line-Drive en courant constant). Ces valeurs sont ensuite converties en une sensibilité globale au bruit en multipliant par la sensibilité du dernier instrument de la chaîne de mesure.

Description Accéléromètre + Préamplificateur	Sensibilité relative au bruit externe (dB)		Sensibilité relative au bruit externe avec isolation de la base de l'accéléromètre (dB)	
	Bruit de boucle de masse	Bruit tribo- électrique	Bruit de boucle de masse	Bruit tribo- électrique
Accéléromètre: normal Amplificateur de charge: entrée à la masse	0 (réf. 1000 pC/V)	0 (réf. 100 pC)	-130	0
Accéléromètre: normal Amplificateur de charge: entrée «flottante»	-70	0	-80	0
Accéléromètre: Line-Drive de B & K Alimentation: Line-Drive de B & K	-26	-80	-154	-80
Accéléromètre: Line-Drive de B & K Alimentation: Line-Drive de B & K avec entrée «flottante»	-70	-80	-134	-80
Accéléromètre: Line-Drive Alimentation: Line-Drive DC (non B & K)	0	-80	-130	-80
Acc. sortie bipolaire Ampli. de charge différentiel	-60	0	-60	0

T0158F0

Table 3.1. Comparaison de l'immunité au bruit externe de plusieurs systèmes «accéléromètre/préamplificateur»

Les résultats de l'analyse suivante sont d'abord présentés ici sous forme d'un tableau (voir Table 3.1) afin de simplifier la comparaison de ces systèmes. Les sensibilités sont exprimées en décibels en rapport avec le cas d'un accéléromètre non isolé connecté à un préamplificateur de charge ordinaire. Ainsi, un signe négatif implique un système moins sensible offrant, par conséquent, une plus grande immunité aux bruits externes.

Deux niveaux de référence sont donnés dans cette table. L'un est pour la sensibilité au bruit dû aux boucles de masse et l'autre pour la sensibilité au bruit d'origine tribo-électrique. Les comparaisons de sensibilités ne sont effectuées qu'entre des sources de bruit de même origine.

3.6.1. Accéléromètre et préamplificateur de charge reliés à la masse

La Fig. 3.19. montre un circuit équivalent pour ce genre montage, dans lequel les sources de bruit de tension et de bruit de charge ont été introduites. En utilisant les relations de base entre charge, tension et capacité, la loi d'Ohm et les suppositions du dernier paragraphe relatives aux niveaux de bruit, on détermine facilement le bruit de charge équivalent à l'entrée du préamplificateur. Chaque source de bruit est considérée séparément.

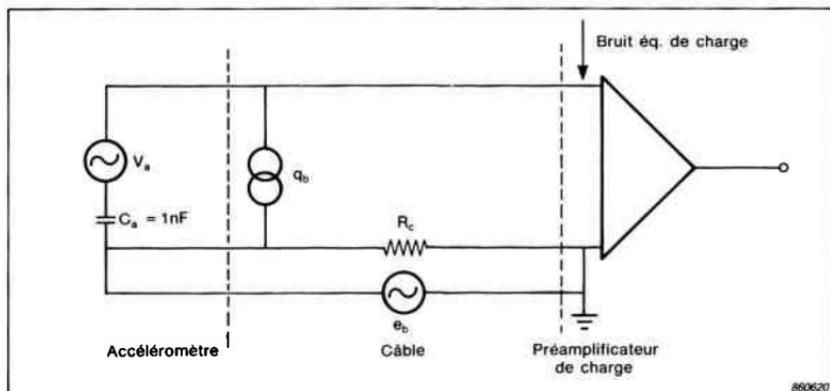


Fig. 3.19. Circuit équivalent simplifié d'un accéléromètre connecté à un amplificateur de charge, tous deux reliés à la masse

Bruit dû aux boucles de masse

C'est tout simplement le produit du bruit de tension par la capacité de l'accéléromètre ($C_a = 1\text{ nF}$), c.-à-d. 1000 pC/V .

Bruit tribo-électrique

Ce bruit est fixé à 100pC dans le but de simplifier la comparaison avec d'autres exemples. Il est beaucoup moins grand que celui dû aux boucles de masse.

3.6.2. Accéléromètre relié à la masse, avec amplificateur de charge (entrée «flottante»)

L'Amplificateur de charge Type 2651 possède l'option d'une entrée «flottante» alors que l'exemple précédent présentait une entrée «rapportée à la masse». Une telle entrée est employée sur tous les préamplificateurs Brüel & Kjær. L'analyse devient un peu plus compliquée lorsqu'un deuxième amplificateur opérationnel est connecté au circuit d'entrée du préamplificateur. Le circuit équivalent de ce montage est montré Fig. 3.20.

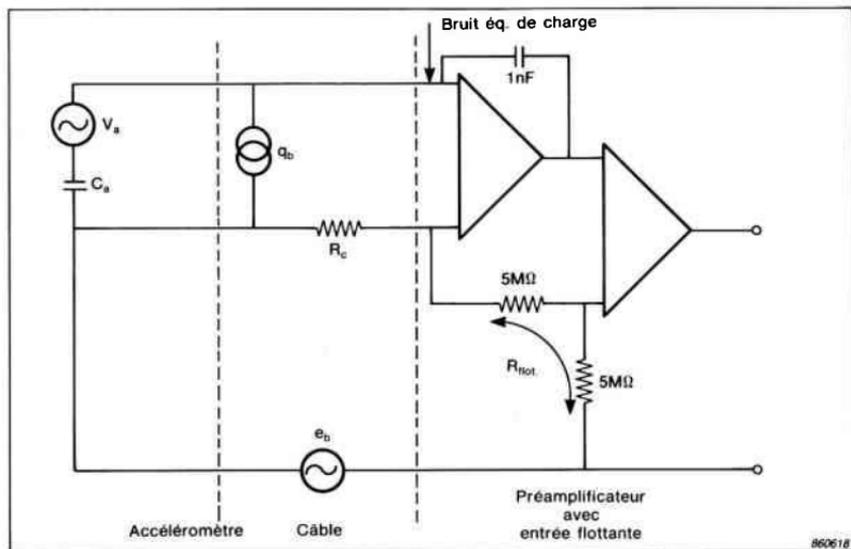


Fig. 3.20. Circuit équivalent simplifié d'un accéléromètre relié à la masse connecté à un préamplificateur de charge avec entrée «flottante»

Bruit dû aux boucles de masse

L'évaluation du bruit dû aux boucles de masse implique l'utilisation du «rapport de réjection en mode commun» (RRMC) du deuxième amplificateur opérationnel. Dans ce cas, le RRMC est d'environ 70 dB (un facteur de $0,3 \times 10^{-3}$). Le bruit venant du câble se partage entre la résistance en série du câble R_c , et la grande résistance de fuite R_{flot} , avant le deuxième amplificateur. Presque toute

cette tension chute à travers R_{flot} . Une valeur typique de R_c est de $0,05 \Omega/m$. La charge équivalente correspondant à la sortie de l'amplificateur à entrée flottante s'obtient en divisant par la sensibilité du même amplificateur, 1 mV/pC .

Le bruit de charge équivalent à l'entrée devient maintenant

$$C_a \frac{R_c}{R_{flot} + R_c} \cdot e_b + \frac{RRMC}{1 \text{ mV/pC}} \cdot \frac{R_{flot}}{R_{flot} + R_c} e_b$$

En remplaçant par les valeurs appropriées, et en supposant que la longueur du câble soit de 200 m, la sensibilité en bruit dû aux boucles de masse serait de $0,301 \text{ pC/V}$.

Bruit tribo-électrique

Il n'est pas affecté par le deuxième amplificateur opérationnel, et reste ainsi d'une valeur de 100 pC à l'entrée.

Dans ce cas, l'utilisation d'une entrée «flottante» élimine les effets de bruit dû aux boucles de masse. Le bruit tribo-électrique est donc le bruit le plus important à considérer.

3.6.3. Amplificateur et source d'alimentation Line-Drive de Brüel & Kjær (avec entrée rattachée à la masse)

La Fig. 3.21 montre le circuit équivalent d'un amplificateur ou d'un accéléromètre Line-Drive relié à une source Line-Drive telle le 2813 ou un analyseur Brüel & Kjær. Le bruit de courant équivalent à l'entrée de la source d'alimentation doit être exprimé. La sensibilité de l'amplificateur Line-Drive est fixée à $1 \mu\text{A/pC}$, et son impédance de sortie à $20 \text{ k}\Omega$.

Bruit de boucle de masse

$$Q = \frac{e_b}{R_o 10^{-6} [A/pC]}$$

La division par $[A/pC]$ convertit ce bruit de courant équivalent (à l'entrée de la source d'alimentation) en un bruit de charge équivalent (à l'entrée de l'amplificateur Line-Drive). Ceci résulte en une sensibilité en bruit équivalent de 50 pC/V .

Bruit tribo-électrique

On peut supposer que le courant i dû aux effets tribo-électriques soit une quantité variant harmoniquement s'il provient d'une excitation mécanique harmonique du câble en basse fréquence.

$$i_b = \frac{dq_b}{dt} = \omega q_{bo} \cos \omega t$$

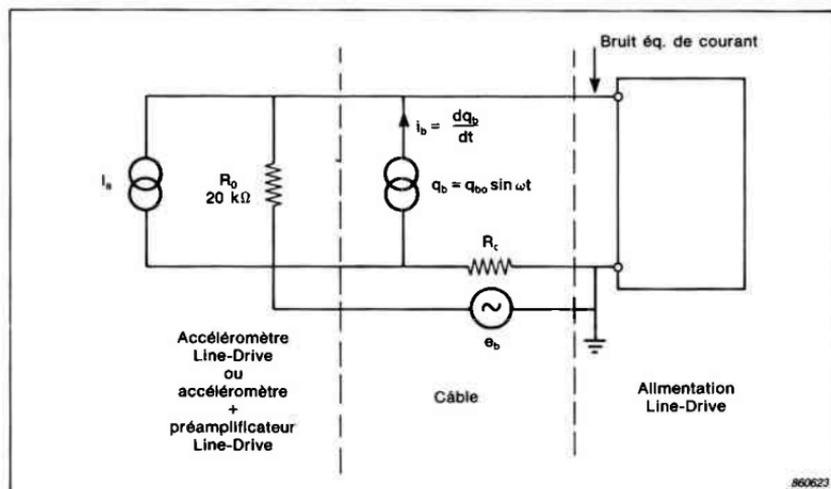


Fig. 3.21. Circuit équivalent simplifié d'un accéléromètre Line-Drive relié à la masse, connecté à une alimentation Line-Drive

Lorsque la sensibilité de la source d'alimentation est prise en considération, cela donne une sensibilité en bruit tribo-électrique de 10^{-2} pC réf. 16 Hz ($\omega = 100$ rad/s) qui augmente avec la fréquence. Pour avoir la même sensibilité en bruit tribo-électrique que celle de l'amplificateur de charge cité paragraphe 3.6.1, la fréquence d'excitation du câble devrait être de 160 kHz. Par conséquent, le système Line-Drive offre une meilleure parade au bruit tribo-électrique qu'un amplificateur de charge ordinaire.

On remarque que le bruit généré par les interférences des boucles de masse est plusieurs milliers de fois plus grand que celui généré par les effets tribo-électriques. Le système Line-Drive montre une plus grande immunité au bruit global qu'un amplificateur de charge ordinaire. Même dans le cas d'un amplificateur de charge à entrée flottante, l'immunité du système Line-Drive au bruit global serait toujours meilleure malgré la présence d'un haut niveau de bruit tribo-électrique.

3.6.4. Amplificateur et source d'alimentation Line-drive (entrée flottante)

Il est possible de «faire flotter» l'entrée de la source d'alimentation Line-Drive de la même manière que celle de l'amplificateur de charge paragraphe 3.6.2. Cette option est disponible sur le 2813. Le circuit équivalent est montré Fig. 3.22. Il est le même que celui du cas précédent, sauf que la résistance de flottement équivalente R_{flot} (≈ 20 kΩ) existe. Elle est produite par un amplifica-

teur opérationnel présent dans le 2813. La tension de boucle de masse se partage encore une fois entre R_c et $R_{flot.}$. Le 2813 possède un RRMC de 70 dB et le câble est supposé être de 200 m de long.

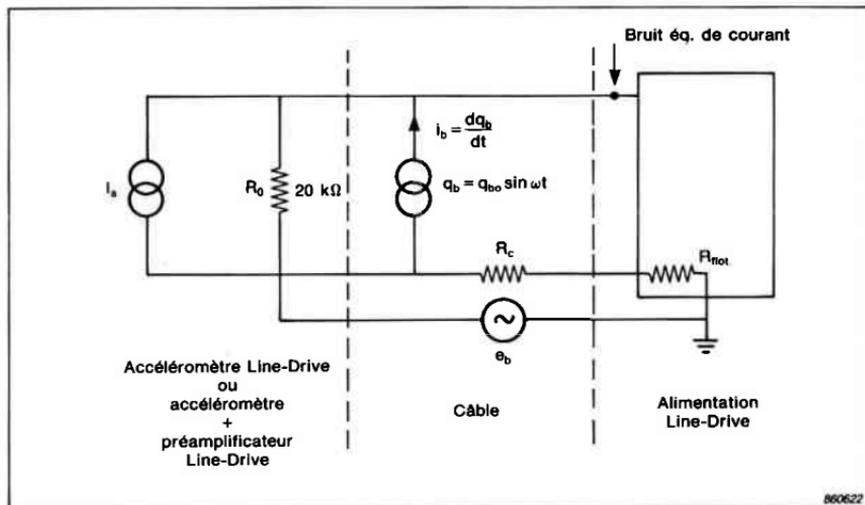


Fig. 3.22. Circuit équivalent simplifié d'un accéléromètre Line-Drive relié à la masse, connecté à une alimentation Line-Drive avec entrée «flottante»

Bruit de boucle de masse

$$q_b = \frac{e_b \frac{R_c}{R_{flot.}}}{R_0 [\Omega] 10^{-6} [A/pC]} + \frac{e_b [V]}{RRMC 1 [mV/pC]}$$

Ceci donne une sensibilité en tension de boucle de masse de seulement $0,325 \text{ pC/V}$, comparable à celle d'un amplificateur de charge ordinaire utilisant une entrée «flottante».

Bruit tribo-électrique

L'apport d'une condition d'entrée flottante ne change pas la sensibilité en bruit tribo-électrique, et les mêmes résultats que ceux du dernier paragraphe sont obtenus.

3.6.5. Système Line-Drive avec une source de courant constant

Ce système n'est pas utilisé par Brüel & Kjær. La source d'alimentation est plus simple que la source de tension constante à modulation de courant, employée dans le 2813. Il faut souligner que le bruit provenant du câble peut provenir de l'induction des champs électromagnétiques présents, surtout si l'on utilise des câbles à deux conducteurs de pauvre qualité. On verra maintenant que l'immunité aux bruits de câble d'un système Line-Drive dépendant d'une source d'alimentation à courant constant n'est pas meilleure que celle du système Brüel & Kjær. Peu importe le type de système Line-Drive utilisé, il est recommandé d'employer des câbles coaxiaux lors de la présence de champs électromagnétiques. Ces points sont très importants car l'intérêt principal lié à l'utilisation d'accéléromètres Line-Drive devrait consister en la suppression des effets dus aux champs électromagnétiques et en la possibilité d'avoir recours à des câbles à deux conducteurs peu coûteux.

Le circuit équivalent d'un système à courant constant est montré Fig. 3.23.

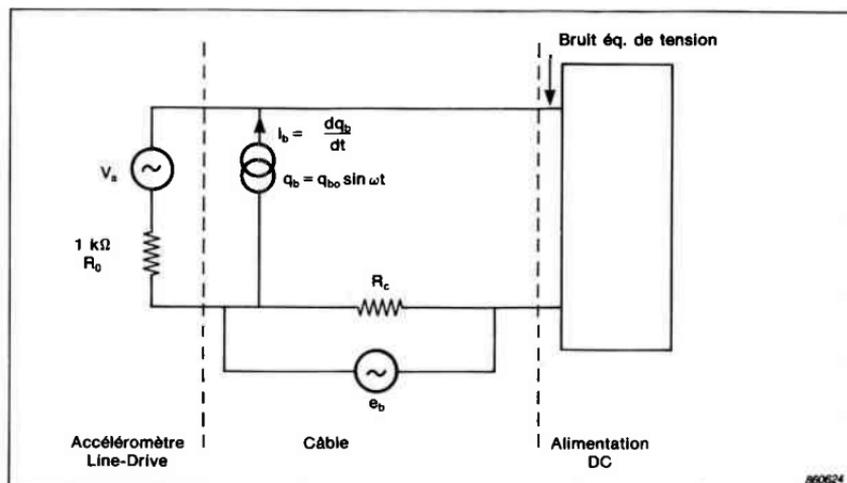


Fig. 3.23. Circuit équivalent simplifié d'un système Line-Drive alimenté par une source de courant constant

Bruit de boucle de masse

La tension de boucle de masse est entièrement développée à l'entrée de la source d'alimentation. Si l'amplificateur Line-Drive avait une sensibilité de 1 mV/pC , la sensibilité en bruit serait de 1000 pC/V . Ce qui est moins bon qu'avec le système Line-Drive de Brüel & Kjær, et ne présente aucune amélioration par rapport à un préamplificateur de charge conventionnel.

Bruit de charge tribo-électrique

$$q_b = \frac{i_b R_o}{1 [mV/pC]}$$

$$= \frac{R_o \omega q_{bo} \cos \omega t}{1 [mV/pC]}$$

À une excitation de 16 Hz, le bruit de charge tribo-électrique est d'environ 10^{-2} pC, le même qu'avec le système Line-Drive de Brüel & Kjær.

3.6.6. Accéléromètre à sortie bipolaire et amplificateur de charge différentiel

Dans un accéléromètre à sortie bipolaire, les éléments piézoélectriques sont isolés du boîtier. Le circuit équivalent est montré Fig. 3.24. Une capacité C_{boit} existe entre chaque point de prélèvement de charge et le boîtier de l'accéléromètre. Sous les conditions de fonctionnement, on a un déséquilibre au niveau des capacités représenté par ΔC_{boit} .

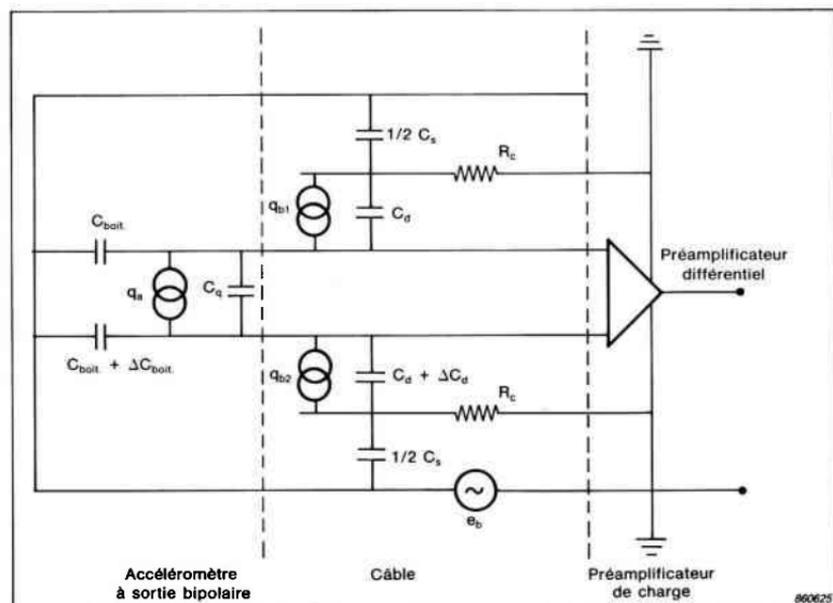


Fig. 3.24. Circuit équivalent simplifié d'un accéléromètre à sortie bipolaire connecté à un préamplificateur de charge différentiel

La capacité entre le blindage externe et les deux blindages internes est représentée par C_s , et est montrée partagée d'une manière égale entre les deux capacités internes.

La capacité du diélectrique enveloppant les deux conducteurs est représentée par C_d et le déséquilibre par ΔC_d .

Les charges tribo-électriques, q_{b1} et q_{b2} sont des sources corrélées qui ne s'annulent pas.

Avec un déséquilibre de 1 pF entre les points de prélèvement sur les éléments piézoélectriques ($\Delta C_{boit.} = 1 \text{ pF}$), le bruit de charge équivalent est de 1 pC/V.

Grâce au grand rapport d'impédance à 50 Hz entre C_s et R_c , le déséquilibre du câble est environ 10^8 fois plus petit que celui du capteur, et peut donc être ignoré.

Les charges tribo-électriques n'étant pas corrélées, elles introduisent toutefois la même quantité de bruit de charge à l'entrée de l'amplificateur de charge, comme avec la combinaison ordinaire «accéléromètre/préamplificateur de charge».

3.6.7. Influence sur le bruit du montage isolé d'un accéléromètre

On peut isoler électriquement un accéléromètre de la surface sur laquelle il est monté (voir paragraphe 4.4). Ceci est accompli soit en plaçant une rondelle de mica sous l'accéléromètre, soit en utilisant un accéléromètre dont la base est isolée. L'effet du bruit de boucle de masse peut être réduit dans tous les cas, sauf dans celui d'un accéléromètre à sortie bipolaire et d'un amplificateur de charge ordinaire avec entrée «flottante». Aucune amélioration n'est possible dans ces deux cas.

Description Accéléromètre et préamplificateur isolés	Sensibilité au bruit de boucle de masse pC/V
Accéléromètre et préamplificateur de charge normaux	$0,3 \times 10^{-3}$
Accéléromètre et alimentation Line-Drive de Brüel & Kjær (entrée rapportée à la masse)	$0,02 \times 10^{-3}$
Accéléromètre et alimentation Line-Drive de Brüel & Kjær (entrée «flottante»)	$0,2 \times 10^{-3}$
Système Line-Drive alimentation DC	$0,3 \times 10^{-3}$

T01163F0

Table 3.2. Comparaison des sensibilités en bruit de boucle de masse de plusieurs systèmes «accéléromètre/préamplificateur», lorsque l'accéléromètre est isolé de la structure

Évidemment, le bruit tribo-électrique généré par câble est indépendant du montage isolé de l'accéléromètre, et la sensibilité en bruit tribo-électrique reste inchangée. Sans recours aux analyses complexes, on peut obtenir les sensibilités en bruit montrées Table 3.2.

3.7. OPTIONS SPÉCIALES POUR PRÉAMPLIFICATEURS

Quelques unes des options suivantes sont disponibles chez Brüel & Kjær pour les préamplificateurs de charge et les instruments mesures de vibrations dotés d'entrée pour préamplificateur. La disposition de ces options au sein d'un préamplificateur Brüel & Kjær est illustrée Fig. 3.25. Pour plus de détails quant aux divers types de préamplificateurs, l'appendice E offre une table de spécifications.

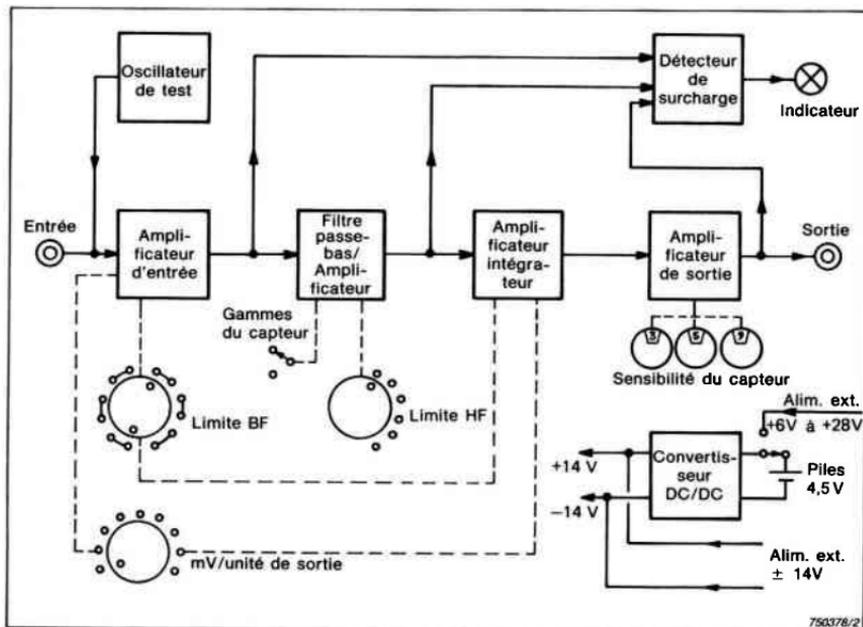


Fig. 3.25. Schéma synoptique d'un préamplificateur de charge Brüel & Kjær

3.7.1 Réseaux d'intégration

L'intégration des signaux d'accélération pour l'obtention de données de vitesse et de déplacement est l'un des avantages distincts de l'utilisation d'accéléromètres comme capteurs dans toute mesure de vibration. On a discu-

té du choix de paramètres de mesure dans le chapitre 1, et on examinera maintenant l'intégration de ces signaux.

Pour les signaux harmoniques, des relations existent entre les paramètres accélération, vitesse et déplacement. Leur intégration n'est qu'une simple division par un facteur proportionnel à la fréquence.

Soit une onde sinusoïdale représentant le signal d'accélération, et s'exprimant par

$$a = a_0 \sin \omega t$$

où

$$\begin{aligned} a &= \text{accélération à l'instant } t \\ a_0 &= \text{amplitude de l'accélération} \\ \omega &= \text{fréquence en radians par seconde.} \end{aligned}$$

La première intégration donne le signal de vitesse v

$$\begin{aligned} v &= \int a \, dt \\ &= \frac{-a_0}{\omega} \cos \omega t \\ &= v_0 \cos \omega t \end{aligned}$$

où

$$v_0 = \frac{-a_0}{\omega}$$

On peut noter que la constante d'intégration est supposée nulle. Ceci n'est pas correct lors de l'intégration de signaux transitoires.

La deuxième intégration donne le signal de déplacement x

$$\begin{aligned} x &= \int v \, dt \\ &= \frac{-a_0}{\omega^2} \sin \omega t \\ &= x_0 \sin \omega t \end{aligned}$$

où

$$x_0 = \frac{-a_0}{\omega^2}$$

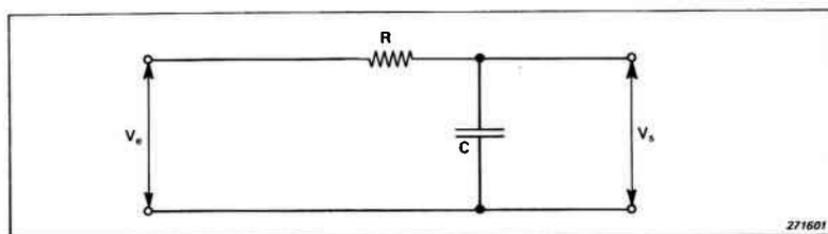


Fig. 3.26. Simple réseau d'intégration RC

Cette simple analyse a démontré que l'intégration est accomplie en divisant l'accélération par un facteur proportionnel à la fréquence pour obtenir la vitesse, et par un facteur proportionnel au carré de la fréquence pour obtenir le déplacement.

On effectue une intégration électronique en utilisant un réseau électronique similaire à celui montré Fig 3.26.

Lorsque la tension V_e de l'accéléromètre et du préamplificateur est appliquée à l'entrée de ce réseau, la tension aux bornes du condensateur, V_s est

$$V_s = \frac{V_e}{1 + j\omega RC}$$

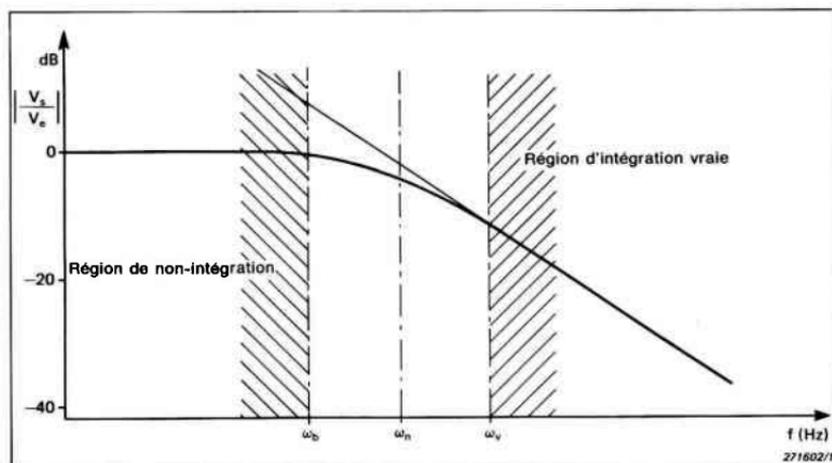


Fig. 3.27. Qualité du signal intégré en fonction de la fréquence

si $\omega RC \gg 1$, alors

$$V_s \approx \frac{1}{jRC} \frac{V_o}{\omega}$$

On remarque qu'une intégration électronique a eu lieu. Le facteur $1/RC$ est déterminé lors de l'étalonnage interne. On accomplit une double intégration en utilisant un deuxième réseau d'intégration pour obtenir les données de déplacement.

Si l'on représente la valeur absolue de la dernière expression en fonction de la fréquence, on obtient une réponse similaire à celle de la Fig. 3.27. Il est à noter l'existence d'une limite basse fréquence, ω_b , sous laquelle aucune intégration vraie n'a lieu. Une intégration partielle s'accomplit entre ω_b et ω_v . Seuls les signaux de fréquence supérieure à ω_v sont vraiment intégrés.

On élargit la gamme d'intégration d'un filtre en amplifiant le signal d'entrée avant qu'il soit appliqué à l'intégrateur. Cette amplification améliore également la gamme dynamique de celui-ci. Un intégrateur de ce genre est qualifié d'«actif» et se trouve dans les préamplificateurs Brüel & Kjær ayant des options d'intégration. La réponse typique d'un intégrateur est illustrée Fig. 3.28. Noter l'existence d'une crête dans le filtre.

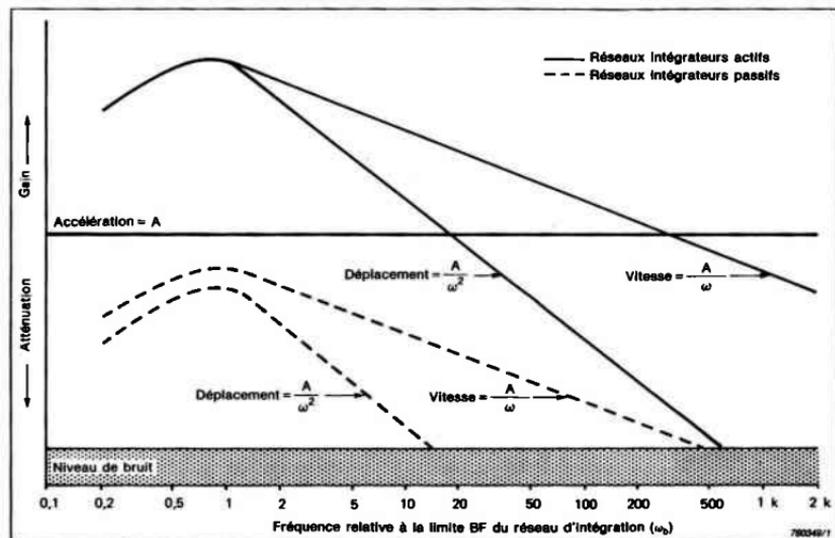


Fig. 3.28. Caractéristiques de la réponse fréquentielle d'un intégrateur électronique

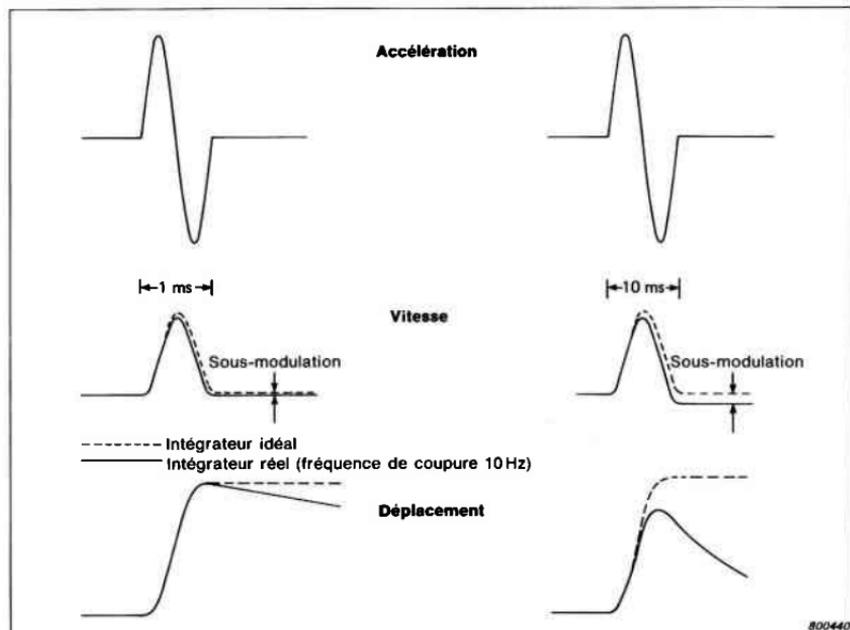


Fig. 3.29. Comparaison des intégrations électroniques et théoriques de deux impulsions d'accélération

Les réseaux d'intégration doivent être utilisés avec précaution lors des mesures de signaux transitoires. Le contenu en basse fréquence d'un signal transitoire est susceptible d'exciter la crête du filtre et, par conséquent, de causer la «résonance» du réseau d'intégration et la distorsion de la mesure. Qui plus est, la réponse en phase de l'intégrateur provoque la distorsion des transitoires. La Fig. 3.29 montre l'effet de l'intégration électronique de deux transitoires d'accélération durant 1 et 10 ms. L'intégration électronique est comparée à l'intégration vraie. Le contenu en basse fréquence du transitoire le plus long provoque des erreurs dans les mesures de valeur crête.

3.7.2. Filtres

Il est souvent désirable de restreindre la gamme de fréquence lors de mesures de vibrations. Par exemple, lors de mesures effectuées sur des machines tournantes contenant des engrenages, des composantes fréquentielles se trouvant en dehors de la gamme d'intérêt pourraient avoir des niveaux sensiblement supérieurs à ceux des vibrations examinées. Si ces hautes fréquences ne sont pas éliminées, elles sont écrêtées par les surcharges d'amplificateur et

créent des fréquences différentielles. Celles-ci sont présentes dans la gamme fréquentielle d'intérêt où elles sont inséparables des composantes des signaux à analyser. Le filtrage d'un signal vibratoire peut en outre optimiser la gamme dynamique de l'instrument de mesure.

On emploie un filtre passe-haut afin de chasser le bruit parasite en basse fréquence, résultant d'entrées non vibratoires telles les transitoires thermiques et les déformations de la base. Celles-ci ne sont des problèmes que lorsque des accéléromètres autres que ceux à Cisaillement en delta[®] sont en utilisation.

Plusieurs préamplificateurs Brüel & Kjær sont munis de filtres actifs, passe-hauts et passe-bas, pour lesquels on peut choisir la limite -3 dB. Pour plus de détails, consulter les Appendices E et F.

En ce qui concerne les mesures de signaux périodiques, les non-linéarités en phase associées aux filtres n'ont aucune influence sur leurs valeurs efficaces, bien qu'on tienne compte de la phase lors des mesures de transitoires. Si le contenu fréquentiel du signal est connu, il est alors possible de choisir la gamme de fréquence qui introduira le moins de distorsion de phase possible. Ceci peut être accompli en se référant à un diagramme similaire à celui de la Fig 3.30. Ce diagramme provient du Manuel d'instruction d'un préamplificateur de charge.

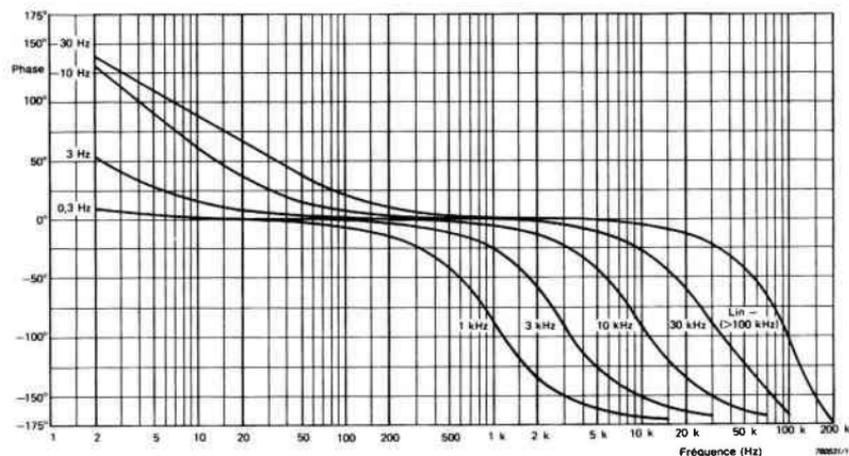


Fig. 3.30. Caractéristiques de la phase d'un préamplificateur de charge Brüel & Kjær sous divers réglages de filtre

Lorsque deux préamplificateurs de charge sont utilisés simultanément, comme dans les mesures d'impédance mécanique ou lors d'un étalonnage, le déphasage maximal, $\Delta\phi$, est déterminé à partir des relations suivantes:

$$\Delta\phi = \tan^{-1} \frac{\frac{f_{c1}}{f_{cn}} - \frac{f_{c2}}{f_{cn}}}{1 + \frac{f_{c1} \cdot f_{c2}}{f_{cn}^2}}$$

Où f_{c1} et f_{c2} sont les limites basse fréquence de chaque préamplificateur, et f_{cn} la fréquence pour laquelle une différence maximale est requise. Cette relation est vérifiée pour les préamplificateurs munis de filtres de 6 dB/octave (20 dB/décade). Si la pente du filtre est de 12 dB/octave (40 dB/décade), l'angle de phase sera deux fois plus grand et la dernière expression devient

$$\Delta\phi = 2 \tan^{-1} \frac{\frac{f_{c1}}{f_{cn}} - \frac{f_{c2}}{f_{cn}}}{1 + \frac{f_{c1} \cdot f_{c2}}{f_{cn}^2}}$$

3.7.3 Indicateur de surcharge

Une caractéristique essentielle et unique des préamplificateurs Brüel & Kjær consiste en un indicateur de surcharge. Elle permet d'éliminer toute possibilité de relever des mesures erronées, en surveillant les niveaux des signaux à la sortie du préamplificateur d'entrée, à la sortie du filtre et à la sortie du préamplificateur de sortie (voir Fig. 3.25). Seule cette disposition peut garantir que les signaux surchargés ne soient pas masqués par le filtrage. Les surcharges sont signalées par une petite lampe témoin. D'autre part, le circuit de détection peut répondre à des surcharges de crête aussi courtes que 20 μ s. On peut ajuster les gains d'entrée et de sortie jusqu'à ce que l'indicateur s'allume. La gamme dynamique de cette partie du système est ainsi optimisée.

3.7.4. Oscillateur de référence

Cet oscillateur est utilisé pour l'étalonnage et le contrôle de systèmes, particulièrement lors de mesures *in-situ*, pour lesquelles on emploie des enregistreurs magnétiques. Un signal de référence peut être enregistré avec les signaux de vibration, et utilisé plus tard pendant l'étalonnage des enregistrements. On a aussi recours à ce signal de référence pour la définition des niveaux, lorsqu'on emploie des amplificateurs de mesure ou des enregistreurs de niveaux.

3.7.5. Sources d'alimentation

Les préamplificateurs Brüel & Kjær sont alimentés de plusieurs manières. Voir les tables dans les appendices E et F.

Dans la mesure du possible, on doit toujours utiliser des sources d'alimentation bipolaire; de cette façon, on a une plus grande suppression des signaux de mode commun et du bruit de la source d'alimentation. Cette particularité est d'une grande utilité pour les montages de mesure de vibration multivoies.

L'alimentation par piles rend les instruments entièrement portatifs et réduit le niveau de bruit du système. Ces deux caractéristiques sont d'un intérêt particulier pour les mesures *in-situ*.

On peut avoir jusqu'à douze sources bipolaires à partir de l'Alimentation Type 2805, laquelle peut aussi bien présenter douze sources unipolaires.

4. PERFORMANCES RÉELLES DES ACCÉLÉROMÈTRES

4.1. INTRODUCTION

Ce chapitre indique les grandes lignes à suivre pour utiliser correctement les accéléromètres piézoélectriques et obtenir des mesures vibratoires précises. La Fig. 4.1 illustre les entrées très diverses susceptibles d'être présentes durant une mesure de vibration. L'accéléromètre à Cisaillement en delta[®] est conçu pour minimiser la contribution de tous ces phénomènes, afin de limiter la dépendance du signal de sortie uniquement à la vibration d'entrée:

1. **Environnement.** Il n'existe pas de capteur de vibrations complètement immunisé contre les effets environnementaux. Cependant, on verra que l'accéléromètre à Cisaillement en delta[®] offre d'excellentes performances sous des conditions environnementales extrêmes. La sensibilité aux effets environnementaux est très basse et bien définie.

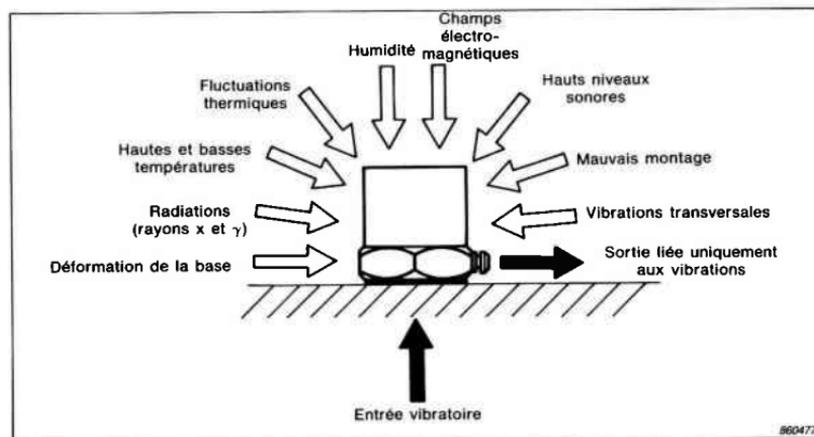


Fig. 4.1. Une sélection des nombreuses entrées indésirables pouvant résulter en des sorties non vibratoires dans un capteur de vibrations de mauvaise conception

2. **Montage.** La technique de montage influence les gammes fréquentielle et dynamique de l'accéléromètre. De plus, on doit tenir compte de la masse de l'accéléromètre et de l'endroit de montage. Les directives présentées dans ce chapitre doivent être respectées à la lettre si l'on désire obtenir une performance optimale.

4.2. EFFETS DUS À L'ENVIRONNEMENT

On est souvent contraint à effectuer des mesures de vibration dans des environnements très hostiles vis-à-vis de l'accéléromètre. Afin de relever des mesures fiables, il est important de concevoir un capteur peu sensible aux influences environnementales. À cet effet, de nombreuses conceptions d'accéléromètre se sont succédées. Aucune, cependant, ne peut rivaliser avec celle à Cisaillement en delta[®]. La faible sensibilité de celle-ci à l'environnement étant bien définie, on peut calculer l'effet d'un champ magnétique ou d'une température excessivement élevée, et ensuite estimer son effet sur le niveau vibratoire global mesuré.

Chaque accéléromètre Brüel & Kjær est fourni avec des spécifications complètes relatives à sa sensibilité aux effets environnementaux. Les méthodes de mesure de ces effets sont décrites dans les normes internationales, en particulier ISO 5347-0:1987, «*Méthodes pour l'étalonnage des capteurs de vibrations et de chocs*», ainsi que la norme américaine ANSI S2.11-1969, «*The selection of calibrations and tests for electrical transducers used for measuring shock and vibration*» («*Choix de méthodes pour l'étalonnage et les essais des capteurs de vibrations et de chocs*»).

4.2.1. Gamme thermique

L'accéléromètre piézoélectrique est capable de mesurer des vibrations sur une grande gamme thermique. Mais à cause des propriétés des matériaux piézoélectriques, on ne peut éviter des variations d'impédance et de sensibilité en tension ou en charge, lorsque l'accéléromètre est utilisé à des températures autres que celle de référence.

Comme exemple, la Fig. 4.2 montre les variations de la capacité, et des sensibilités en tension et en charge du PZ 23 qui est le matériau piézoélectrique employé dans la presque totalité des accéléromètres Brüel & Kjær. Dans la fiche d'étalonnage fournie avec chaque accéléromètre, on trouvera un diagramme similaire renfermant des informations quant au matériau piézoélectrique utilisé. Les variations en sensibilité sont bien définies, et aucun changement durable n'intervient lorsque la température redevient égale à celle de l'étalonnage. Lorsque l'accéléromètre est utilisé à des températures élevées, sa sensibilité réelle (tenant compte du changement causé par l'élévation de la température de fonctionnement), peut être déterminée à l'aide d'un tel diagramme.

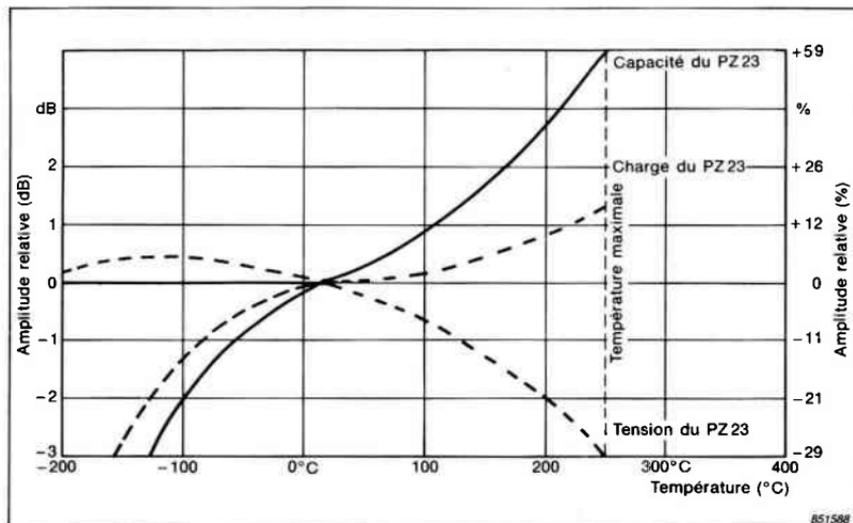


Fig. 4.2. Dépendance thermique de la capacité et des sensibilités en charge et en tension du matériau piézoélectrique PZ 23

Il n'est pas facile de déterminer le temps que prend la sensibilité pour retourner à la valeur mentionnée sur la fiche d'étalonnage. Mais il dépend partiellement de la température à laquelle l'accéléromètre a été exposé. Si la température ambiante varie lentement, la sensibilité de l'accéléromètre suit la courbe montrée Fig. 4.2. D'autre part, pour des changements de température rapides, le matériau piézoélectrique présente un effet d'hystérésis et l'accéléromètre prend un certain temps pour se stabiliser à la sensibilité indiquée sur sa fiche d'étalonnage. Une période de 24 heures est généralement nécessaire lorsque l'accéléromètre est brusquement ramené à la température ambiante à partir de sa température de fonctionnement maximale.

On spécifie pour chaque accéléromètre sa température de fonctionnement maximale, au-dessus de laquelle l'élément piézoélectrique commence à subir une dépolarisation qui cause une déviation permanente de la sensibilité. Cette température est de 250° C pour les accéléromètres employant le PZ 23. À des températures jusqu'à 50° C au-dessus de la limite spécifiée, la perte est progressive. Et au-delà, une dépolarisation rapide entraîne une détérioration irréversible de l'accéléromètre.

À des températures supérieures à 250° C, on a recours à l'Accéléromètre industriel Type 8310, qui est conçu pour être utilisé jusqu'à 400° C. Il est possible d'isoler thermiquement la base d'un accéléromètre d'usage général de la surface vibrante. À cette fin, on emploie un écran en métal de grande

conductivité thermique, tel celui montré Fig.4.3. Cette méthode augmente le taux de chaleur déviée de l'accéléromètre. Un tel écran permet de prendre des mesures sur des surfaces dont la température est de 450° C. Toutefois, on doit se rappeler que la rigidité du point de fixation de l'accéléromètre peut être altérée par la présence d'un tel écran et donc causer une diminution de la fréquence de résonance de l'accéléromètre monté; il en résulte une compression de la gamme fréquentielle utile. Quant aux autres instruments faisant partie de cette même chaîne de mesure, ils ont en général une gamme thermique moins grande et doivent être éloignés de l'accéléromètre.

La limite basse température de la plupart des accéléromètres Brüel & Kjær est spécifiée à -74° C. On n'a pas de spécifications définies à des températures plus basses, mais on peut toujours utiliser les accéléromètres d'usage général à des températures aussi basses que celle de l'azote liquide (-196° C).

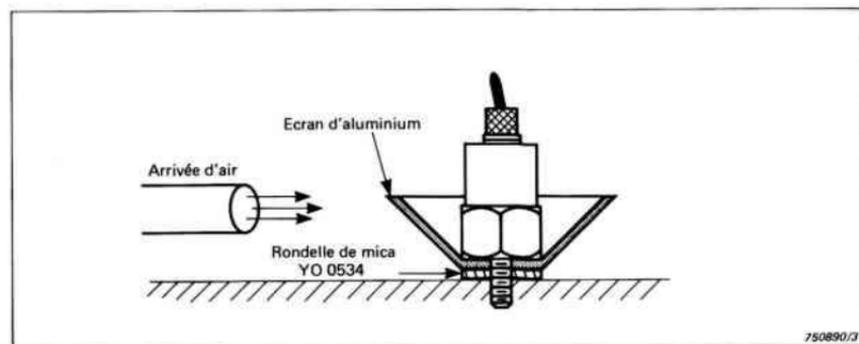


Fig. 4.3. Montage d'un accéléromètre sur une surface chaude en utilisant un écran d'aluminium pour accroître la dissipation de chaleur

4.2.2. Transitoires thermiques

Des fluctuations assez rapides de la température ambiante lors d'une mesure, dues par exemple à des courants d'air, donnent naissance à un signal de bruit basse fréquence dans l'accéléromètre. Ce signal est dû à deux facteurs.

1. **L'effet pyroélectrique.** Un phénomène par lequel les cristaux piézoélectriques et les céramiques ferroélectriques se chargent à cause des différences et des variations thermiques. Dans les céramiques artificiellement polarisées, cette charge se développe sur les surfaces *perpendiculaires* à la direction de polarisation. Par conséquent, lorsque la charge induite par vibration est prélevée *perpendiculairement* à la direction de polarisation, comme dans les conceptions à compression, cette charge pyroélectrique est elle aussi prélevée et il s'ensuit des résultats erronés à la sortie.

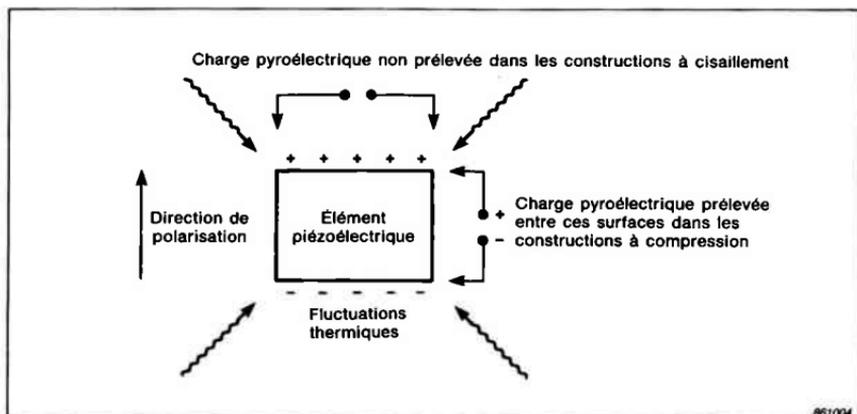


Fig. 4.4. Immunité d'un matériau piézoélectrique aux fluctuations thermiques, en modes cisaillement et compression. La charge indiquée est causée par l'effet pyroélectrique et n'est pas liée à la vibration

Cependant, dans la conception à Cisaillement en delta[®], cette charge additionnelle n'est pas prélevée puisque les points de prélèvement de charge se trouvent sur des surfaces *parallèles* à la direction de polarisation. Voir Fig. 4.4.

Les accéléromètres à Cisaillement en delta[®] sont donc insensibles aux transitoires thermiques (environ 100 fois moins que les accéléromètres à compression). Chez Brüel & Kjær, le choix minutieux des éléments piézoélectriques contribue à minimiser cet effet.

- 2. Expansion thermique non-uniforme.** Ceci est possible lorsque les parties de l'accéléromètre se contractent ou se dilatent à des vitesses différentes, ou lorsque l'accéléromètre est exposé à un gradient thermique. Les deux phénomènes résultent en des forces agissant sur l'élément piézoélectrique. Les conceptions à compression sont plus sensibles à ces effets que celles à cisaillement.

Ces effets ne deviennent évidents que lorsque des vibrations de bas niveau et de basse fréquence sont mesurées. Dans le cas de mesures en extérieur, sur des grandes structures telles des bâtiments, des ponts ou des navires, où les vents prédominants peuvent causer des refroidissements soudains, il est nécessaire de choisir un accéléromètre de faible sensibilité à ces effets. Divers environnements industriels peuvent aussi poser des problèmes de fluctuations thermiques, mais puisque la plupart des mesures sont relevées à de hauts niveaux de vibration, ces effets ne sont pas si sérieux.

On retrouve la sensibilité typique d'un accéléromètre aux transitoires thermiques sur sa fiche d'étalonnage. Il est possible de réduire ou même d'éliminer le bruit basse fréquence causé par ces fluctuations thermiques en employant l'une des méthodes suivantes.

1. **Choix correct.** Le plus important de tous les facteurs de réduction des effets des transitoires thermiques est le choix correct de la conception d'accéléromètre. Le choix de la conception à Cisaillement en delta[®] est beaucoup plus approprié que celui de la construction à compression.
2. **Filtre passe-haut.** Si l'on a recours à la conception à compression, il est nécessaire d'utiliser un filtre passe-haut afin d'éliminer les sorties parasites en basse fréquence. De tels filtres sont inclus dans la plupart des préamplificateurs Brüel & Kjær utilisés dans les mesures de vibration. On a un choix de limites BF allant de 0,3 Hz à 30 Hz. Une limite BF de plus de 3 Hz est utile lorsqu'un accéléromètre à compression est utilisé dans un environnement présentant des fluctuations thermiques. Les amplificateurs Line-Drive tels le 2644 ou ceux incorporés aux Accéléromètres Types 4390, 8317 et 8318 ont des limites basse fréquence définies qui minimisent ces effets. Pour plus de détails sur chacun de ces préamplificateurs, consulter leurs fiches techniques correspondantes.
3. **Écran.** Dans quelques cas, il est possible d'attacher un écran ou un isolateur thermique léger autour de l'accéléromètre. L'écran antivent d'un microphone se prête très bien à cette fonction. On peut aussi construire ce genre de protection à l'aide d'un polystyrène léger.

4.2.3. Sensibilité acoustique

La plupart des vibrations sont associées à une sortie acoustique. D'autre part, les mesures de vibrations sont souvent effectuées dans des environnements à hauts niveaux de pression sonore. Les accéléromètres à Cisaillement en delta[®] sont conçus de telle façon que ces niveaux de pression sonore n'interfèrent pas avec les mesures de vibrations. On y parvient en employant des accéléromètres de construction rigide et mécaniquement isolée. Leur sensibilité acoustique typique est de l'ordre de 0,0001 à 0,004 ms⁻² pour un niveau de pression sonore de 154 dB dans la gamme allant de 2 à 100 Hz¹. D'autres constructions possèdent des sensibilités acoustiques supérieures à celle-ci. Les anciennes constructions à compression agissaient effectivement comme des microphones à cause de l'absence d'isolation mécanique entre le boîtier de l'accéléromètre et les lamelles piézoélectriques.

¹ La sensibilité acoustique est mesurée dans cette gamme mais est probablement constante jusqu'en haute fréquence. Voir paragraphe 5.5.4.

Dans certains cas, les vibrations induites acoustiquement par la structure sous test sont des facteurs plus importants à considérer.

4.2.4. Contraintes de base

Ceci est plus facilement assimilé si l'on se réfère aux «déformations de base». À chaque fois qu'un accéléromètre est monté sur une structure vibrante, sa base est sujette à des forces de déformation et l'on mesure la charge qui en résulte. La fréquence de cette charge est toujours celle de la vibration. Par conséquent, cet effet est remarquable en basse fréquence où les déplacements, donc les contraintes, sont grands.

Une faible sensibilité aux contraintes est particulièrement importante dans la conception du circuit de contre-réaction d'un compresseur pour les montages de test de vibrations. L'accéléromètre fournissant le signal de contre-réaction pourrait être soumis à de grandes contraintes de base. Dans cette éventualité, le signal d'excitation destiné à l'excitateur de vibrations serait altéré.

Les accéléromètres Brüel & Kjær à Cisaillement en delta[®] sont peu sensibles aux contraintes de base car les éléments piézoélectriques sont bien isolés de la base. Il n'est donc pas nécessaire que la base soit très épaisse, et donc lourde, comme c'est le cas dans toutes les conceptions à compression.

L'Accéléromètre de référence Type 8305 est d'une conception à compression et utilise un disque de béryllium pour isoler les lamelles piézoélectriques des effets dus aux contraintes de base. Sous les conditions particulières de l'étalonnage, la déformation de base n'affecte guère les performances de cet accéléromètre.

La sensibilité typique aux contraintes de base d'un accéléromètre à Cisaillement en delta[®] est de $0,02 \text{ ms}^{-2}/\mu\epsilon$ à une contrainte de base équivalente à $250 \mu\epsilon$. La valeur typique pour chaque accéléromètre est indiquée dans sa fiche d'étalonnage.

4.2.5. Effets de l'humidité

Tous les accéléromètres Brüel & Kjær sont d'une construction hermétique avec un boîtier soudé ou empreint d'époxy, qui les protège de l'humidité. Lorsqu'ils sont utilisés dans des conditions extrêmement humides, on doit sceller entièrement les câbles et les connecteurs pour ne pas diminuer la résistance de l'accéléromètre et détériorer sa réponse en basse fréquence. Pour cela, on peut utiliser un produit tel que RTV 738 de Dow Corning ou le film adhésif 2253 de 3M Scotch. Les blindages des câbles d'accéléromètre Brüel & Kjær sont imperméables et insensibles aux immersions.

4.2.6. Sensibilité magnétique

Les accéléromètres Brüel & Kjær sont tout à fait insensibles aux champs magnétiques. Leur sensibilité varie entre 0,5 et 30 ms⁻² par Tesla (0,005 et 0,3 g par kGauss). Le pire des cas est lorsque le flux magnétique s'écoule dans la direction de la sensibilité maximale.

4.2.7. Effets des radiations

À l'exception de ceux de type Line-Drive, tous les accéléromètres Brüel & Kjær sont utilisables même exposés aux radiations gamma (100 Gy/h, 6MeV) jusqu'à des doses accumulées de 20kGy (1 Gy=100rad). Les tests indiquent que la sensibilité des accéléromètres change de moins de 10% après une telle exposition. On peut employer un câble d'accéléromètre ordinaire mais des câbles spéciaux sont recommandés pour des doses accumulées dépassant 1 kGy. L'Accéléromètre industriel Type 8310 ne subit qu'une variation de sensibilité de moins de 3% à ces doses et peut donc être utilisé dans des conditions de radiation extrêmes. Avec des doses accumulées de 1MGy et 10¹⁸ neutrons par centimètre carré (10kGy/h, 1 à 5MeV et un flux thermique de 10¹² neutrons par centimètre carré par seconde), on obtient une variation de sensibilité d'environ 5%. Pour plus de détails, voir les fiches techniques des accéléromètres industriels.

4.3. INFLUENCE DE LA MASSE D'UN ACCÉLÉROMÈTRE

Lorsqu'un accéléromètre est monté sur une structure vibrante, l'augmentation de la masse totale, en plus d'un changement de la rigidité locale, altère inévitablement les propriétés dynamiques de la structure.

Ces changements ne sont significatifs que si l'accéléromètre introduit une impédance mécanique additionnelle de même amplitude que celle de la structure avant que l'accéléromètre ne soit monté. L'impédance mécanique, Z_a , appliquée à la structure par l'accéléromètre est fonction de sa masse m_a

$$Z_a = \omega m_a$$

Cette relation est valable jusqu'à des fréquences égales à 0,9 fois la fréquence de résonance monté. À l'intérieur de cette gamme, l'accélération de la partie de la structure à proximité de l'accéléromètre devient:

$$a_m = a_s \frac{Z_s}{Z_s + Z_a} \approx a_s \frac{m_s}{m_s + m_a}$$

où

a_m = accélération mesurée par l'accéléromètre

a_s = accélération de la structure en l'absence d'accéléromètre

Z_s = impédance mécanique de la structure en l'absence d'accéléromètre

m_s = «masse» de la structure. Dans plusieurs cas, l'impédance mécanique est essentiellement la masse de la structure à proximité de l'accéléromètre

On a aussi une réduction des fréquences de résonance propres à la structure, en rapport avec la relation suivante

$$f_m = f_s \sqrt{\frac{m_s}{m_s + m_a}}$$

où

f_m = toute fréquence de résonance propre à la structure, avec l'influence de la masse de l'accéléromètre

f_s = toute fréquence de résonance propre à la structure sans l'influence de la masse de l'accéléromètre

Ces relations montrent que si la masse de l'accéléromètre, donc l'impédance mécanique, est maintenue petite par rapport à la masse de la structure, toute variation vibratoire sera elle aussi petite. Une règle générale est de s'assurer que la masse de l'accéléromètre ne soit pas supérieure au dixième de la masse de la structure.

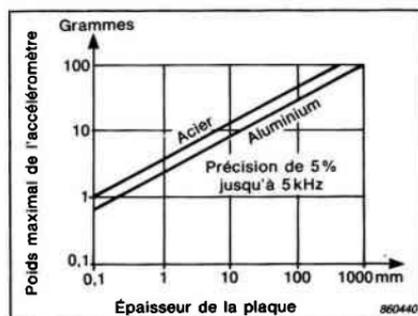


Fig. 4.5. Relation obtenue par calcul entre la masse de l'accéléromètre et la variation vibratoire de la plaque (acier/aluminium)

La Fig. 4.5 montre une relation obtenue par calcul entre la masse requise de l'accéléromètre et l'épaisseur d'une plaque pour un changement spécifié de niveau d'accélération sur une gamme fréquentielle définie. On emploie cette relation lors de mesures de vibrations sur des plaques légères, en acier ou en aluminium.

4.4. MONTAGE DE L'ACCÉLÉROMÈTRE

Afin de mesurer les vibrations avec précision, on doit s'assurer que:

1. Les gammes fréquentielles et dynamiques utiles ne soient pas limitées par un mauvais montage de l'accéléromètre.
2. La masse additionnelle de l'accéléromètre n'altère pas les caractéristiques vibratoires de l'objet sous test.
3. Les points de mesure puissent être repérés avec précision, assurant donc une répétabilité des mesures.

Le choix du montage peut sérieusement affecter chacun des critères cités. On a déjà vu que la gamme fréquentielle utile d'un accéléromètre est déterminée par sa fréquence de résonance monté. Celle-ci est spécifiée dans la fiche d'étalonnage individuelle de chaque accéléromètre. La fréquence de résonance est évaluée dans des conditions de montage optimales, à l'aide de goujons de montage standard sur un bloc d'acier de 180 g dont les surfaces ont subi une finition aux normes définies Fig. 4.6.

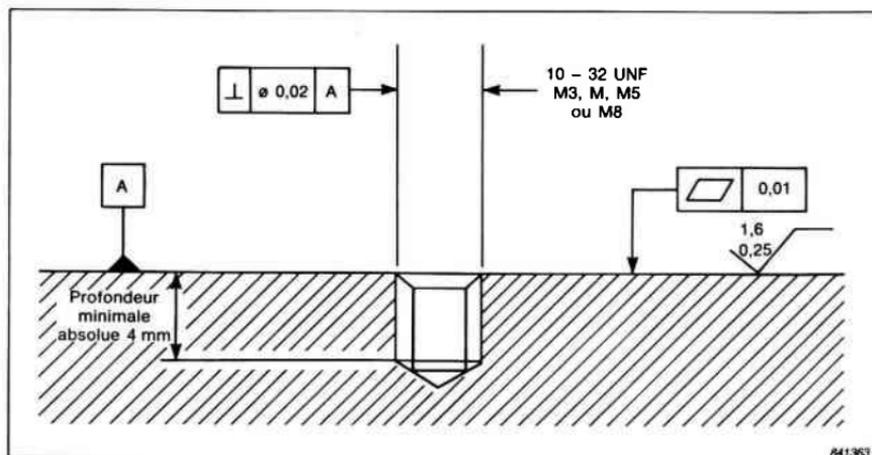


Fig. 4.6. Tolérances recommandées pour la surface de montage et le trou de fixation taraudé. Les spécifications dimensionnelles et les symboles sont conformes à la norme ISO 1101

4.4.1. Spécifications inhérentes à la finition de la surface de test

Il est essentiel que la surface de test soit aussi propre que possible afin d'avoir une haute fréquence de résonance montée. Si possible, la surface devrait avoir une finition telle celle définie Fig. 4.6. Le trou de montage de l'accéléromètre doit être percé en respectant les normes indiquées dans la même figure. La surface est dégraissée avec des solvants tels l'acétone.

4.4.2. Emplacement du montage de l'accéléromètre

Dans plusieurs cas, l'emplacement du montage de l'accéléromètre est presque évident et n'est dicté que par le but de la mesure vibratoire. L'accéléromètre doit être monté avec son axe de sensibilité principal aligné dans la direction de mesure voulue.

Cependant, on a déjà fait allusion au fait que l'accéléromètre répond aux vibrations dans des directions autres que celle de l'axe de sensibilité principal. Le point rouge marqué sur les accéléromètres Brüel & Kjær doit être aligné avec la direction de vibrations transversales maximales afin de minimiser leurs effets.

On choisit un emplacement de montage assurant un chemin de transmission court et rigide vers la source de vibrations. Ce chemin doit éviter tout élément souple ou amortisseur présent dans la structure, comme les joints, par exemple. Lors de mesures de vibrations sur une machine tournante, les paliers sont souvent de bons emplacements pour le montage d'un accéléromètre.

Les vibrations horizontales, verticales et axiales contiennent souvent des informations intéressantes. L'emploi d'un accéléromètre triaxial permet d'obtenir des données simultanées concernant la vibration, sur trois axes mutuellement perpendiculaires.

La réponse dynamique de plusieurs structures peut s'avérer très compliquée et seules de petites différences quant à l'emplacement du montage peuvent impliquer de grandes différences dans les mesures, particulièrement en haute fréquence. En règle générale, on ne prend jamais de mesures au niveau d'un point nodal. Pour identifier les emplacements des points nodaux et des ventres sur une structure donnée, on a recours à une analyse vibratoire rapide à l'aide d'une sonde tenue à la main, similaire à celle décrite paragraphe 4.4.9.

Les vibrations les plus difficiles à mesurer sont peut-être celles appliquées à l'homme. Ce domaine peut couvrir les vibrations de l'ensemble du corps et celles du couple main-bras. Les deux cas requièrent des considérations spécifiques de type de capteur, de gamme dynamique, de technique de montage et d'emplacement de montage.

4.4.3. Détermination de la réponse fréquentielle des accéléromètres avec diverses techniques de montage

Les paragraphes suivants décrivent les techniques de montage et leur influence sur les gammes dynamique et fréquentielle des accéléromètres. La plupart des techniques réalisables sont couvertes. Les mesures de réponse fréquentielle sont effectuées à l'aide d'un petit excitateur magnétique servant à entraîner une table mobile pesant 180 g, et sur laquelle on monte l'accéléromètre. L'accélération de la table est maintenue constante sur une grande gamme fréquentielle grâce à un circuit électronique de contre-réaction.

Afin de simplifier la comparaison, on utilise le même accéléromètre d'usage général dans toutes les mesures. La Fig. 4.7 compare les réponses en fréquence les plus importantes obtenues en utilisant les techniques de montage couvertes dans ce paragraphe.

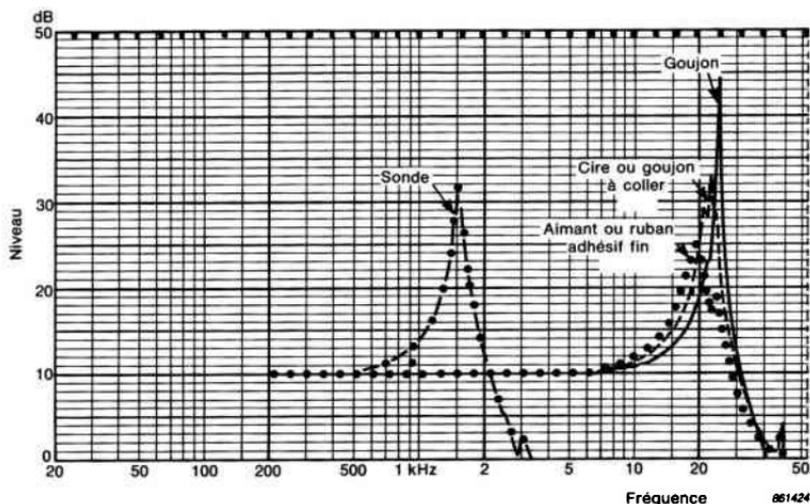


Fig. 4.7. Comparaison des courbes de réponse fréquentielle obtenues en utilisant diverses techniques de montage

4.4.4. Montage avec goujon

Méthode:

1. Préparer la surface de l'objet testé aux tolérances indiquées Fig. 4.6. La base de l'accéléromètre doit être aussi propre et lisse que possible.
2. Percer et tarauder le trou requis dans l'objet testé. Ce trou dépend du type d'accéléromètre utilisé. Il doit être assez profond pour accueillir le goujon

de l'accéléromètre. Pour les accéléromètres miniatures, employer le Taraud QA 0041 pour un filetage M3 acceptant un Goujon d'acier YQ 2007 de 8 mm de longueur. Pour les accéléromètres d'usage général, employer le Taraud QA 0029 et des Goujons de montage YQ 2960 et YQ 2962 de 12 et 8 mm respectivement (tous deux 10-32 UNF). Enfin, pour l'Accéléromètre Type 8318, utiliser un Taraud QA 0141 pour filetage M8 et un Goujon YQ 9335.

3. Visser le goujon dans le trou fileté, puis l'accéléromètre sur le goujon. Vérifier que la partie du goujon dépassant l'objet testé soit plus courte que le trou fileté de l'accéléromètre, et visser l'accéléromètre à l'aide d'une clef, en s'assurant de ne pas trop le serrer. Voir Fig. 4.8.

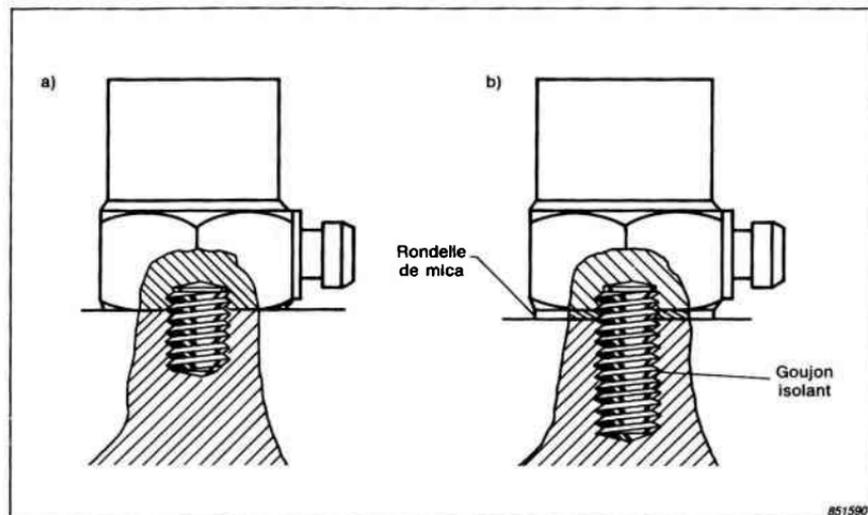


Fig. 4.8. Utilisation d'un goujon pour monter un accéléromètre. À droite, montage avec un goujon isolant et une rondelle de mica

Applications:

1. Mesures de vibrations haute fréquence nécessitant la plus grande fréquence de résonance monté possible.
2. Surveillance permanente de vibrations.

Avantages:

1. Performance optimale de l'accéléromètre. Cette méthode doit être utilisée autant que possible.
2. Le montage ne limite pas la gamme thermique de l'accéléromètre.
3. Fonctionnement à de très hauts niveaux vibratoires.

Inconvénients:

1. Le temps requis pour préparer la surface de l'objet de test, percer et tarauder le trou, est assez long.

Remarques:

1. Une fine couche de graisse de silicone appliquée entre la base de l'accéléromètre et la surface de l'objet de test améliore les performances en haute fréquence, notamment si la surface n'est pas parfaitement lisse.
2. Le couple de serrage recommandé pour le montage de l'accéléromètre dépend de la nature du goujon utilisé. Ce couple est de 1,8 Nm pour un goujon ordinaire 10-32 UNF et de 0,60 Nm pour un goujon de filetage M3. Le «serrage avec les doigts» peut, à première vue, sembler à peine suffisant ($\approx 0,3$ Nm), mais s'il est énergique, les différences entre les réponses fréquentielles mesurées de l'accéléromètre sont minimales. Ce n'est que pour étudier les plus hautes fréquences que l'on doit utiliser une clef. Voir Fig. 4.9.
3. Éviter d'appliquer un couple de serrage excessif en employant une clef car le goujon peut se cisailer et le filetage se détériorer. On aurait ainsi des difficultés à retirer le goujon de l'accéléromètre ou de l'objet testé; l'accéléromètre pourrait être détérioré à jamais.
4. Le goujon ne doit en aucun cas atteindre le fond du filetage de l'accéléromètre. Si la base de l'accéléromètre n'est pas en contact avec la surface vibrante, de grandes erreurs peuvent se produire.

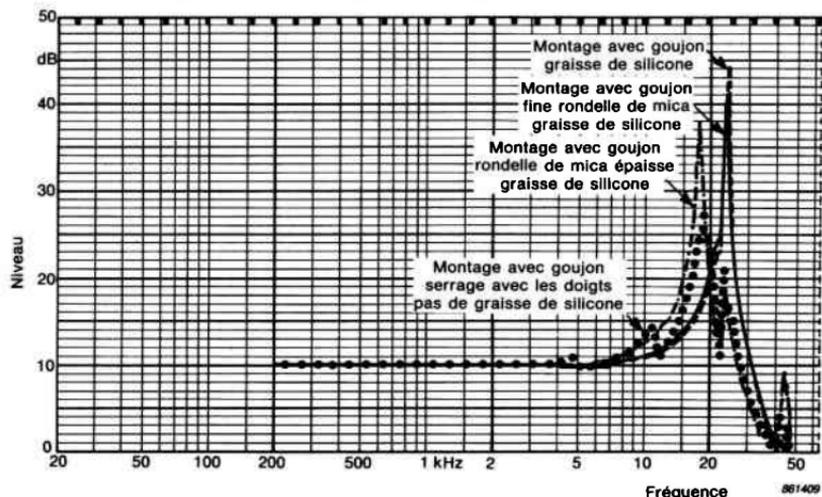


Fig. 4.9. Réponse fréquentielle d'un accéléromètre d'usage général monté sur goujon, avec des techniques de montage légèrement différentes les unes des autres

- Puisque des boucles de masse peuvent apparaître dans les montages de mesure, notamment dans les montages multi-points sur de grandes machines, on doit isoler électriquement l'accéléromètre de l'objet testé. On y parvient en utilisant un accéléromètre dont la base est isolée ou en employant une Rondelle de mica YO 0534 ou YO 0746 avec un Goujon isolant YP 0150. L'addition de la rondelle de mica abaisse quand même la fréquence de résonance monté, particulièrement à des températures supérieures à 80° C auxquelles un «glissement» peut affecter le goujon. Essayer d'utiliser la rondelle de mica la plus fine possible afin d'obtenir un bon couplage mécanique.
- L'Accéléromètre miniature Type 4374 n'est pas conçu pour être monté sur goujon, et on utilise donc une autre méthode.
- L'Accéléromètre de mesure de chocs Type 8309 possède un goujon de filetage M5.
- Les accéléromètres industriels sont montés sur vis.

4.4.5. Montage à la cire

Méthode:

- S'assurer que la surface de montage soit aussi lisse que possible, et que la base de l'accéléromètre soit bien nettoyée.
- Prendre une petite quantité de Cire YJ 0216, fournie avec l'accéléromètre, et l'amollir avec les doigts.
- Étaler la cire sur la surface de test, en couvrant une partie plus large que la base de l'accéléromètre. La couche doit être tout juste assez épaisse pour remplir le vide entre les deux surfaces.
- Faire glisser l'accéléromètre sur la cire, puis en le pressant et en le faisant tourner en même temps, le fixer à la surface. Ceci nécessite un peu d'entraînement. Voir Fig. 4.10.

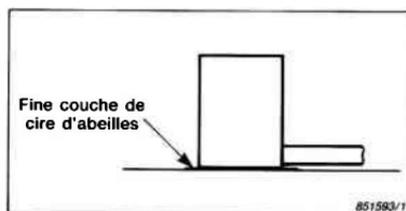


Fig. 4.10. Accéléromètre miniature monté à la cire

Applications:

1. Mesures rapides de vibrations.
2. Mesures où il est impossible, ou bien même indésirable, de percer et de monter un goujon.
3. Fixation d'accéléromètres n'ayant pas de trous taraudés dans leur base.

Avantages:

1. Possibilité de montage rapide et facile.
2. La fréquence de résonance montée n'est que légèrement inférieure à celle du montage avec goujon.

Inconvénients:

1. Sérieuses limitations en température: 40°C.
2. Le niveau de vibration maximal est d'environ 100 ms⁻².

Remarques:

1. La mauvaise tenue en température est due à l'amollissement de la cire. Il en résulte une diminution de la rigidité du couplage, impliquant une décroissance de la fréquence de résonance montée jusqu'à ce que l'accéléromètre se détache de la surface de test.

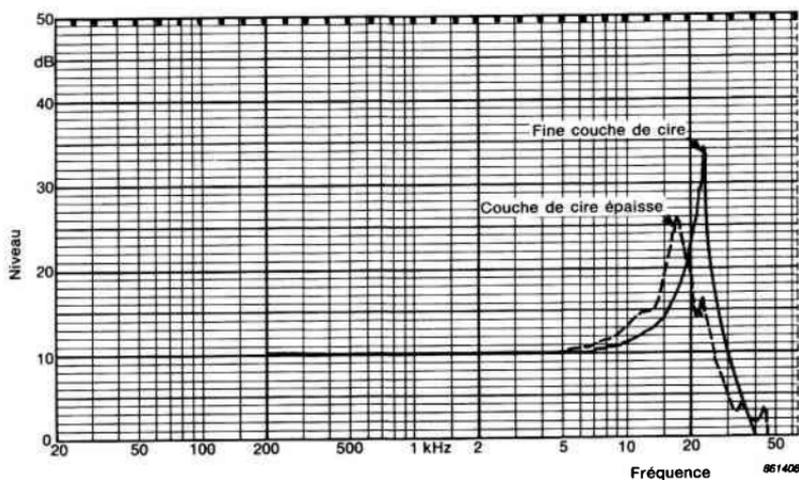


Fig. 4.11. Réponse fréquentielle d'un accéléromètre d'usage général monté à la cire

2. L'emploi excessif de la cire cause une diminution de la fréquence de résonance monté et une compression de la gamme fréquentielle de mesure. Voir Fig. 4.11.

4.4.6. Montage sur aimant

Méthode:

1. S'assurer que la surface de test et que l'accéléromètre soient bien nettoyés de toute graisse et qu'ils ne présentent pas de protubérances.
2. Visser l'accéléromètre sur un Aimant UA 0642 et serrer à l'aide d'une clef si nécessaire. Un aimant de taille plus petite est disponible pour le montage d'accéléromètres miniatures. On améliore la réponse en haute fréquence en appliquant une fine couche de graisse de silicone entre la base de l'accéléromètre et l'aimant ainsi qu'entre l'aimant et la structure, et ce avant de fixer l'accéléromètre à la structure. Voir Fig. 4.12.

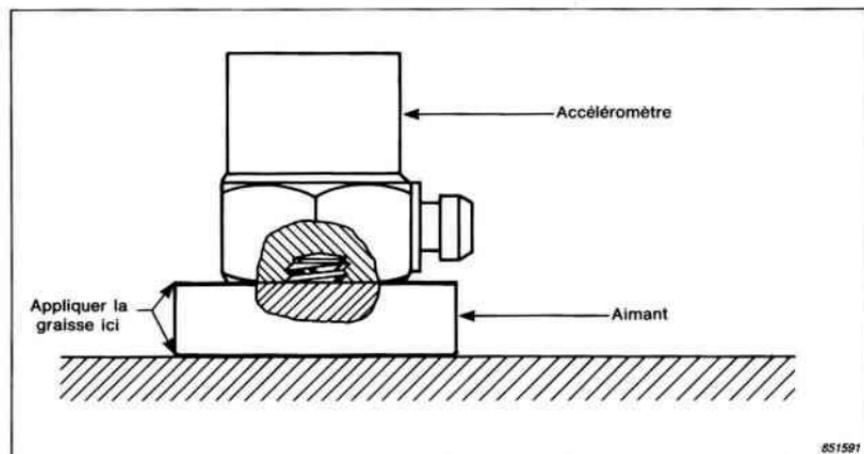


Fig. 4.12. Montage d'accéléromètre sur Aimant UA 0642

Applications:

1. La rapidité de cette méthode la rend idéale pour les mesures préliminaires sur, par exemple, les machines industrielles, avant qu'une décision ne soit prise quant à l'emplacement d'un point de surveillance permanent.

Avantages:

1. Méthode très rapide.

2. Considérant la faible rigidité du couplage, cette méthode offre de bonnes performances en haute fréquence, notamment sur les surfaces plates. Voir Fig. 4.13.
3. Supporte des accélérations élevées.

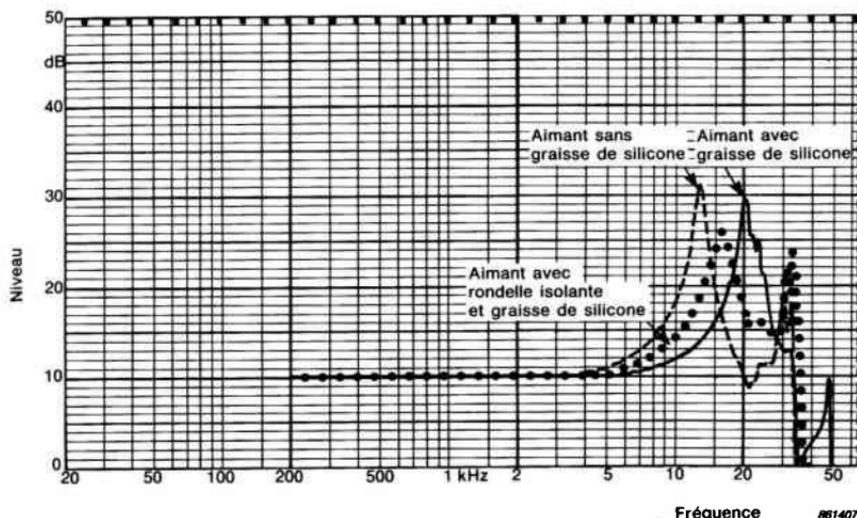


Fig. 4.13. Réponse fréquentielle d'un accéléromètre d'usage général monté sur aimant

Inconvénients:

1. La surface de l'objet testé doit être ferromagnétique. Une alternative serait de coller un disque ferromagnétique (ou de le visser) à même la structure.
2. Une répétabilité absolue du point de mesure ne peut pas être garantie.
3. L'addition d'un aimant crée une masse additionnelle sur la structure. Ceci pourrait être un inconvénient sérieux lors de mesures sur des structures légères puisque l'Aimant UA 0642 pèse 16 g.

Remarques:

1. Il est possible d'isoler électriquement l'accéléromètre de l'objet testé. On y parvient en utilisant la rondelle isolante autocollante PTFE fournie avec le Jeu de 5 aimants de montage UA 0643. On place la rondelle entre la surface de l'objet testé et l'aimant.
2. Les mesures sont possibles sur les surfaces courbes comme celles des canalisations, bien que la gamme fréquentielle se comprime avec la diminution du rayon de courbure.

3. La force de retenue maximale de l'aimant varie entre 35 et 60 N, suivant l'état de la surface et l'utilisation ou non des rondelles isolantes. Par conséquent, les niveaux vibratoires maximaux varient en fonction du poids combiné de l'accéléromètre et de l'aimant. La fiche technique de chaque accéléromètre Brüel & Kjær mentionne cette limite. Par exemple, on peut utiliser un accéléromètre pesant 17 g à des niveaux d'accélération de $1,2 \text{ kms}^{-2}$ alors qu'on ne peut pas excéder $0,2 \text{ kms}^{-2}$ avec un accéléromètre pesant 175 g.

4.4.7. Rondelles de montage autocollantes

Méthode:

1. S'assurer que la surface de l'objet de test et l'accéléromètre soient propres.
2. Détacher l'un des films protecteurs de la rondelle et coller celle-ci fermement à la base de l'accéléromètre. Voir Fig. 4.14.
3. Détacher le film protecteur de l'autre face de la rondelle et fixer l'accéléromètre à la surface vibrante.

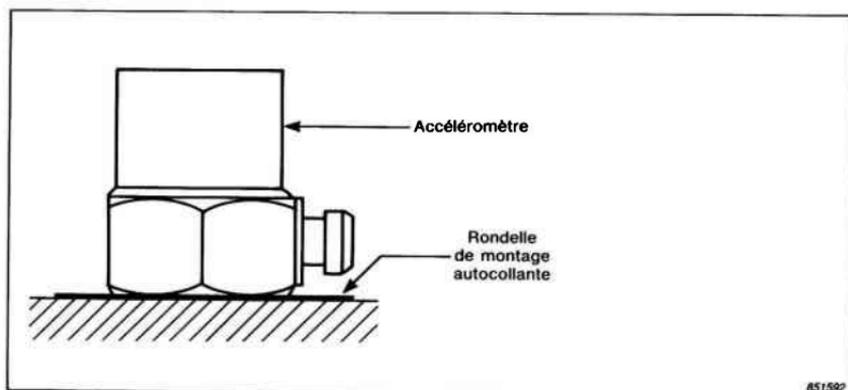


Fig. 4.14. Montage d'accéléromètre rondelle autocollante

Applications:

1. Mesures rapides de vibrations.
2. Mesures où il est impossible, ou bien même indésirable, de percer un trou fileté pour goujon.
3. Fixation d'accéléromètres n'ayant pas de trous taraudés dans leur base.

Avantages:

1. Méthode rapide offrant une réponse en haute fréquence et supportant les accélérations élevées.
2. Isolation électrique assurée.

Inconvénients:

1. Fonctionnement limité en haute et en basse température.

Remarques:

1. Des rondelles autocollantes sur leurs deux faces sont disponibles en deux modèles: Rondelles DU 0079 (\varnothing 40 mm) et Rondelles YO 0073 (\varnothing 5,5 mm). Les plus petites sont disponibles en jeux de 25 rondelles et sont conçues pour être utilisées avec les accéléromètres miniatures. Les plus grandes sont fournies séparément et sont capables de maintenir fixés les plus grands accéléromètres, sous n'importe quel angle et avec suffisamment de force adhésive pour conserver une performance raisonnable en haute fréquence. Voir Fig. 4.15. Cependant, on doit toujours se rappeler que cette méthode, ainsi que les autres, ne peut qu'approcher les performances optimales du montage avec goujon.
2. On peut aussi bien utiliser un ruban adhésif des deux côtés et obtenir de bons résultats si le ruban est assez mince. Par contre, si celui-ci est très épais, les performances en haute fréquence sont amoindries.

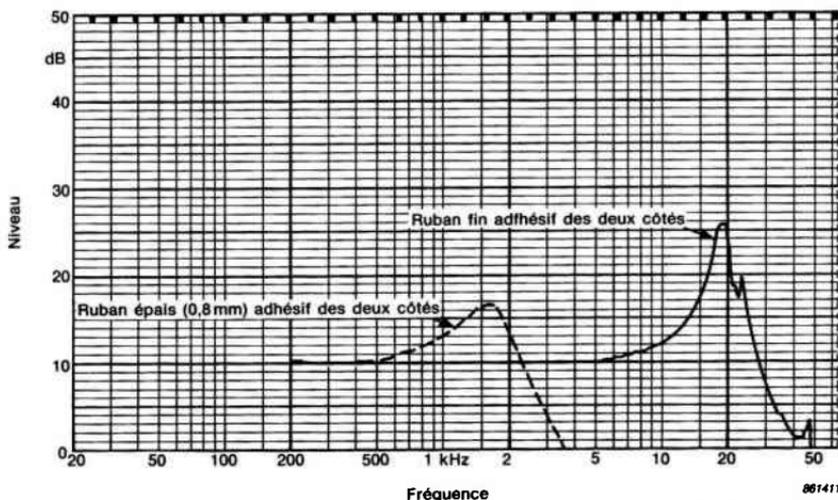


Fig. 4.15. Réponse fréquentielle d'un accéléromètre d'usage général monté sur rondelle autocollante

4.4.8. Adhésifs

Il existe deux méthodes pour monter un accéléromètre à l'aide d'adhésifs.

Fixation directe

Méthode:

1. S'assurer que la surface soit aussi lisse et aussi propre que possible.
2. Utiliser un adhésif rapide du type cyanoacrylate. Voir Fig. 4.16.

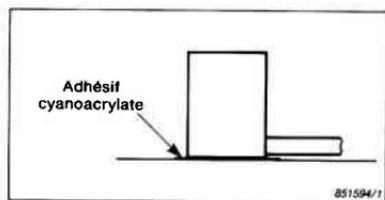


Fig. 4.16. Montage d'accéléromètre miniature sur adhésif cyanoacrylate

Applications:

1. Cette méthode est beaucoup employée avec les accéléromètres miniatures.
2. Surveillance permanente de vibrations là où il n'est pas possible d'utiliser la méthode de montage par goujon.

Avantages:

1. Excellentes performances en haute fréquence et hauts niveaux d'accélération.

Inconvénients:

1. Il n'est pas facile de retirer l'accéléromètre de la surface de test et dans tous les cas, il est nécessaire de nettoyer la base de l'accéléromètre après utilisation à l'aide d'un solvant approprié. Ceci peut prendre assez de temps.
2. La répétabilité de l'emplacement de montage n'est pas garantie.
3. L'isolation électrique est difficile.

Montage par goujon à coller

Méthode:

1. S'assurer que la surface soit aussi lisse et aussi propre que possible.

2. Choisir le goujon à coller approprié et le fixer à l'objet testé à l'aide d'un adhésif époxy. Laisser sécher. On recommande l'Araldite[®].
3. Visser fermement l'accéléromètre sur le goujon avec les doigts. On ne peut utiliser une clef qu'avec précaution. Voir Fig. 4.17.

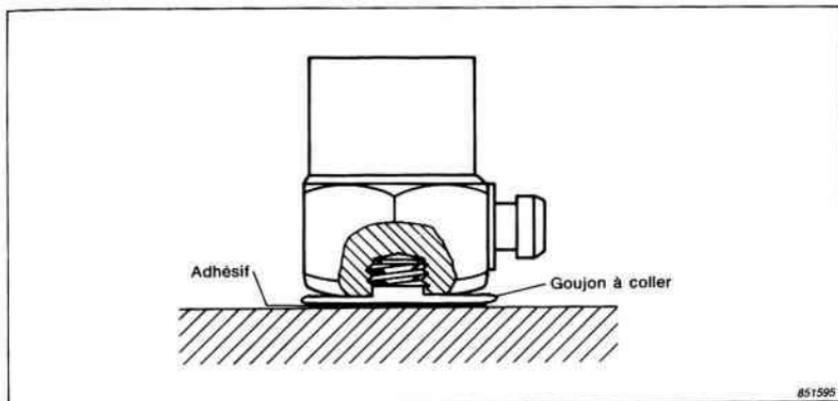


Fig. 4.17. Montage d'accéléromètre sur goujon à coller

Applications:

1. Surveillance de vibrations multi-points où l'accéléromètre est fréquemment déplacé d'un emplacement à un autre. La répétabilité est requise mais le montage avec goujon normal n'est pas possible.

Avantages:

1. Bonnes caractéristiques de mesures.

Inconvénients:

1. Prend trop de temps (si l'on utilise un adhésif époxy).
2. Il peut être difficile de retirer l'accéléromètre ainsi que la colle durcie de l'objet testé.
3. Isolation électrique difficile. Cependant, l'addition de deux feuilles de fibre de verre sous le goujon à coller peut procurer une bonne isolation. Une alternative serait d'étaler une fine couche de colle et de laisser sécher.
4. Limite maximale en température typique de 80° C, dépendant de la nature de l'adhésif employé. Plusieurs adhésifs convenables en haute température sont disponibles, comme le 3M Cyanolite HG303 qui est utilisable jusqu'à 200° C.

Remarques:

1. La colle cyanoacrylate ne peut être employée que sur les surfaces les plus lisses pour la simple raison que les protubérances que présentent les surfaces rugueuses, comme la base d'un goujon à coller, peuvent créer des interstices qui réduisent le pouvoir adhésif de ce genre de colle.
2. Les adhésifs époxy conviennent pour coller un accéléromètre directement à la surface, bien qu'ils ne soient pas plus rapides que le genre cyanoacrylate.
3. Les adhésifs «mous» ne sont **pas** recommandés à cause de la réduction de la rigidité de couplage, laquelle à son tour comprime énormément la gamme fréquentielle. Voir Fig. 4.18. Les adhésifs «mous» possèdent aussi de mauvaises caractéristiques en haute fréquence.
4. Le 3M Cyanolite 101 et le Permabond 747 QS 0007 sont des adhésifs pratiques, de nature méthyl cyanoacrylate. On peut les utiliser de -50°C à 80°C . D'autres genres d'adhésifs aussi pratiques sont le Eastman (Kodak) 910MHT et le Loctite IS.
5. Le serrage à la clef d'un accéléromètre à goujon doit être extrêmement délicat. L'expérience montre qu'en retirant l'ensemble accéléromètre/goujon de la surface, la base du goujon se cisaille, et la partie filetée du goujon reste fermement vissée à la base de l'accéléromètre.
6. Trois types de goujons à coller sont disponibles. On a d'abord le DB0756 ($\varnothing 14\text{ mm}$) et le DB2790 ($\varnothing 25\text{ mm}$). Tous deux présentent un filetage 10-32 UNF, compatible avec la majorité des accéléromètres Brüel & Kjær. Le

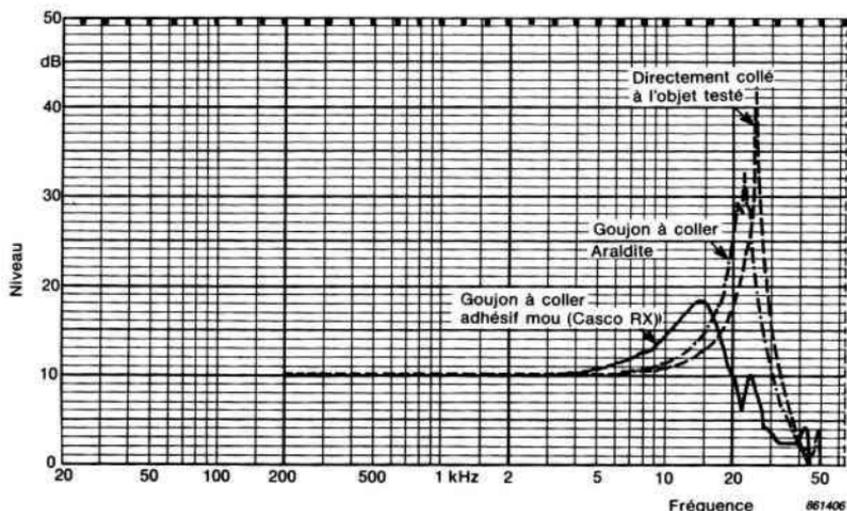


Fig. 4.18. Réponse fréquentielle d'un accéléromètre d'usage général monté sur adhésif

DB0756 est disponible en Jeux de 25 pièces UA 0866. On a aussi le DB0757 (\varnothing 8 mm), présentant un filetage M3. Il est lui aussi disponible en Jeux de 25 pièces UA 0867.

4.4.9. Sonde*

Méthode:

1. Visser l'accéléromètre sur la Sonde tenue à la main YP0080 (filetage 10-32 UNF). Voir Fig. 4.19

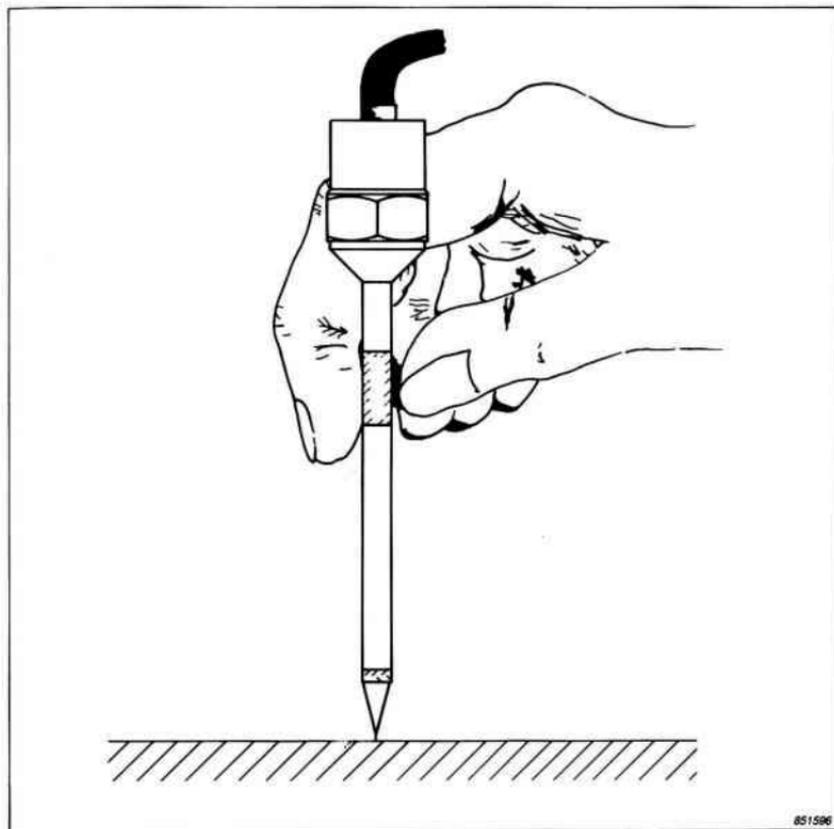


Fig. 4.19. Utilisation d'une Sonde tenue à la main YP0080 pour mesures vibratoires rapides

* On doit toujours tenir compte des restrictions inhérentes à cette méthode lors des mesures.

2. Tremper la pointe de la sonde dans une petite quantité de graisse aux silicones et l'appuyer ensuite sur la surface de test en s'assurant que le manche de la sonde y soit perpendiculaire et que la pointe ne glisse pas.

Applications:

1. Seulement pour les mesures ponctuelles rapides et les contrôles à moins de 1 kHz.

Avantages:

1. La plus rapide des méthodes existantes.

Inconvénients:

1. La fréquence de résonance monté est si basse qu'elle se trouve dans la gamme fréquentielle de la plupart des mesures de vibration, ce qui donne des résultats erronés. On recommande l'emploi de filtres passe-bas lors de l'utilisation de cette sonde. Voir Fig. 4.20.
2. Très mauvaise répétabilité.

Remarques:

1. L'application de graisse aux silicones augmente la rigidité de couplage. On peut obtenir une légère expansion de la gamme fréquentielle en utilisant la Sonde avec embout arrondi DB 0544.

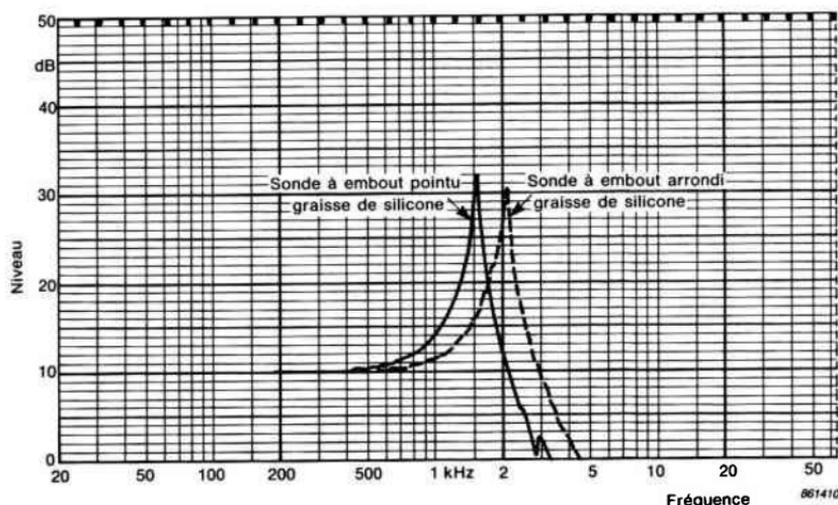


Fig. 4.20. Réponse fréquentielle d'un accéléromètre d'usage général monté sur une Sonde YP0080

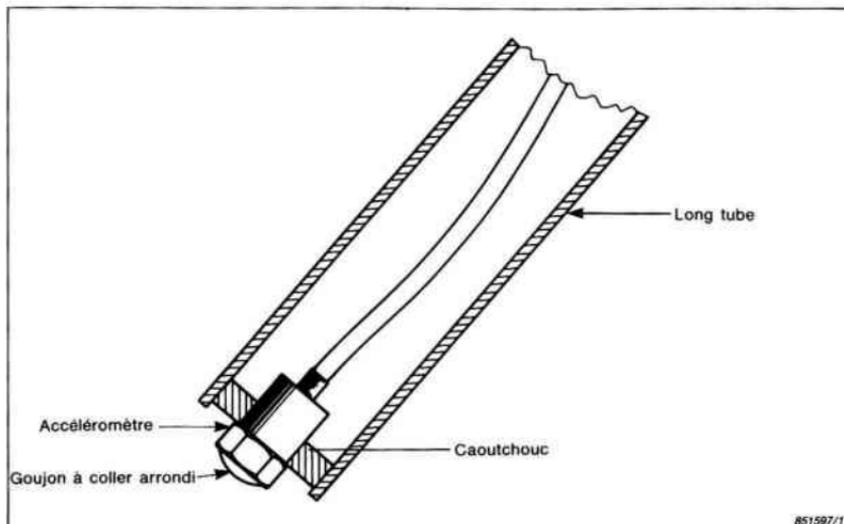


Fig. 4.21. Sonde inversée. Le caoutchouc découple effectivement le tube de la sonde de telle manière que la résonance de la sonde n'est pas excitée

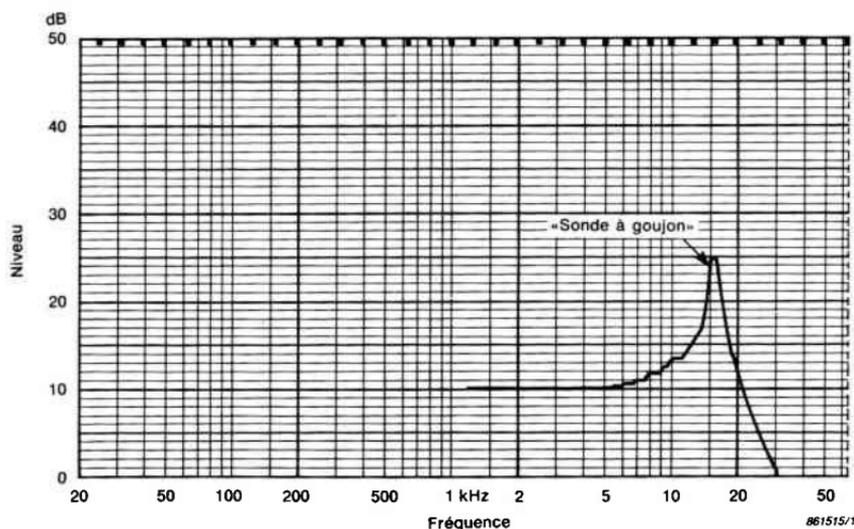


Fig. 4.22. Réponse fréquentielle d'un accéléromètre d'usage général monté sur sonde inversée

2. Une sonde inversée similaire à celle illustrée Fig. 4.21 peut être construite, ce qui permet de mesurer des vibrations en des endroits où il n'est pas facile d'atteindre le point de mesure désiré. On peut utiliser un goujon à coller arrondi en guise d'embout de sonde. Cette technique améliore les performances en haute fréquence, comparées à celles de la première sonde. Voir Fig. 4.22.

4.5. FILTRES MÉCANIQUES

Le Filtre mécanique UA 0559 est un dispositif très simple et très utile, utilisable avec la plupart des accéléromètres Brüel & Kjær. Il est disponible en Boîtes de 5 filtres UA 0553.

Ce qui suit est une courte liste d'applications possibles avec un filtre mécanique.

1. Mesures de vibrations de basse fréquence et de bas niveaux vibratoires, «cachées» par des vibrations de haute fréquence et de hauts niveaux vibratoires.
2. Protection des accéléromètres contre les hauts niveaux de choc et évitement des effets de déviation du zéro.
3. Isolation électrique entre l'accéléromètre et la structure.
4. Établissement d'une limite haute fréquence définie et particulièrement utile lorsque le préamplificateur utilisé n'est pas doté de filtres incorporés.
5. Élimination de l'influence des vibrations transversales.

4.5.1. Description

Le Filtre mécanique UA 0559, illustré Fig. 4.23, est doté d'un boîtier inoxydable, solide et anti-corrosion. Ce boîtier présente un trou taraudé 10-32 UNF à la base pour montage sur l'objet testé, et une vis filetée 10-32 UNF sur le haut pour



Fig. 4.23. Le Filtre mécanique UA 0559

haut pour fixation de l'accéléromètre. La partie supérieure est solidaire d'un bloc de caoutchouc butyl qui isole électriquement la partie supérieure de la base, et agit comme un filtre passe-bas entre la structure et l'accéléromètre. Le boîtier présente aussi un trou latéral à travers lequel on peut insérer une tige pour solidariser les parties supérieure et inférieure l'une de l'autre, et protéger le bloc caoutchouc de tout effet de torsion lors de la fixation de l'accéléromètre sur le filtre. La tige peut aussi servir au montage du filtre sur la surface vibrante. Le couple de serrage recommandé est de 1,8Nm.

4.5.2. Fonctionnement

La Fig. 4.24 reflète très bien l'influence du filtre mécanique sur les réponses des axes principal et transversal de l'accéléromètre. Le filtre se conduit comme un filtre passe-bas, atténuant donc les résonances de ces mêmes axes. Tandis que la résonance normale de l'accéléromètre provoque une augmentation de la sensibilité d'environ 30 dB au dessus de la sensibilité nominale, le filtre mécanique cause une résonance amortie de 3 à 4 dB avec une courbe de pondération haute fréquence de 40 dB/décade. Une caractéristique additionnelle est que l'on peut ajuster la fréquence de coupure simplement par l'addition d'une masse entre l'accéléromètre et le filtre. La sensibilité aux vibrations transversales est aussi réduite.

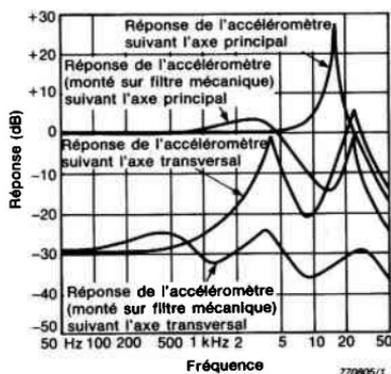


Fig. 4.24. Réponse fréquentielle typique des axes principal et transversal d'un accéléromètre Brüel & Kjær monté sur filtre mécanique

Le processus de filtrage étant dépendant des caractéristiques de rigidité et d'amortissement du caoutchouc, il y a donc aussi une dépendance thermique. En basse température, la rigidité du bloc caoutchouc augmente et la fréquence de résonance augmente avec, en parallèle, une diminution de l'amortissement. D'autre part, en haute température, la rigidité décroît à même titre que la fréquence de résonance et que l'amortissement. Voir Fig. 4.25.

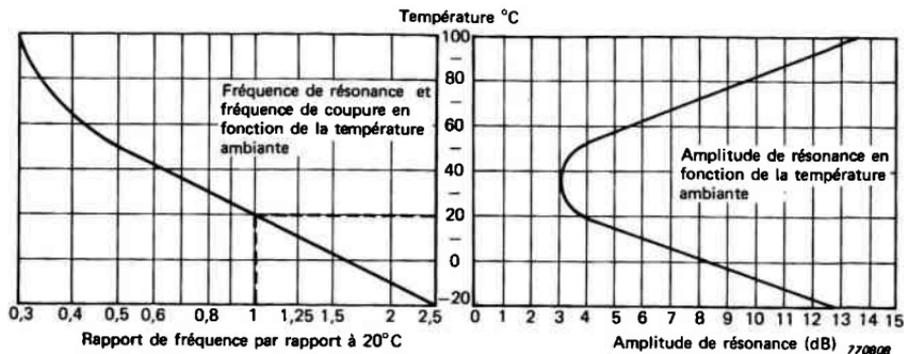


Fig. 4.25. Réponse thermique typique du Filtre mécanique UA 0559

Si l'on doit utiliser le filtre mécanique dans des environnements d'hydrocarbures, on recommande l'emploi d'un joint résistant de caoutchouc à base de silicone, autour de la partie supérieure du filtre et à l'entrée du trou latéral.

Des détails supplémentaires concernant le filtre mécanique sont disponibles dans les fiches techniques correspondantes.

4.6. CÂBLES D'ACCÉLÉROMÈTRES

Les mesures vibratoires erronées sont souvent dues à un mauvais montage et à la disposition du câble reliant l'accéléromètre à l'amplificateur de charge. Voici les sources d'erreurs les plus fréquentes:

1. Lorsqu'un câble coaxial est sujet à des effets de flexion, de compression ou de tension, le blindage à l'intérieur du câble se sépare momentanément du diélectrique en certains points. Des variations locales de capacité sont ainsi créées et causent la formation de charges. Cet effet est connu sous le nom d'effet tribo-électrique et devient particulièrement gênant lors de la mesure de bas niveaux vibratoires, où il apparaît sous forme de bruit.
2. Les champs électromagnétiques très puissants peuvent induire une tension à travers le câble, donnant donc naissance à un bruit présent dans le signal mesuré.
3. Dans les conceptions à compression, si l'on n'empêche pas le câble de vibrer, les forces de déformation peuvent être transmises aux disques piézoélectriques à travers le connecteur.

Le premier de ces problèmes peut être considérablement réduit par l'emploi d'un câble coaxial conçu avec traitement pour réduction de bruit. C'est là une caractéristique de tous les câbles d'accéléromètres fournis par Brüel & Kjær. De plus, le câble ne doit pas être excessivement plié ou tordu car non seulement le traitement pour réduction de bruit sera affecté, mais les connecteurs seront également endommagés. On doit fixer le câble à même l'objet testé pour éviter les mouvements à l'origine du bruit tribo-électrique. Voir Fig. 4.26.

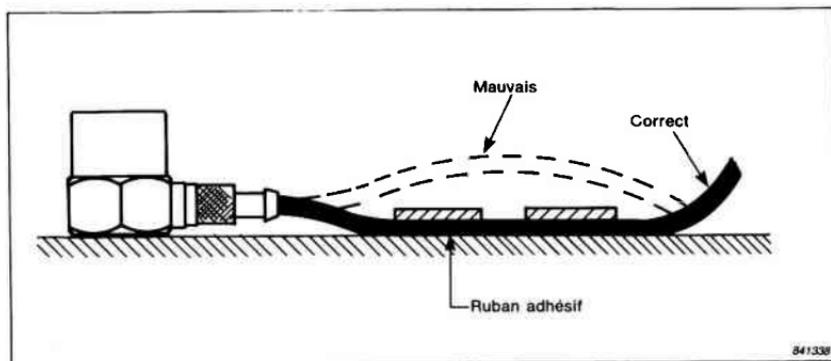


Fig. 4.26. Fixation du câble d'accéléromètre pour réduction du bruit de câble

Le second problème est résolu par un acheminement étudié du câble, loin des sources électromagnétiques. Le cas échéant, on emploie soit un système Line-Drive, soit un accéléromètre à sortie bipolaire avec câble spécial. Les avantages de ces systèmes ont été discutés paragraphe 3.6 et résumés dans table 3.1. Consulter les fiches techniques de l'Accéléromètre Type 8310 et de l'Amplificateur de charge Type 2634.

La plupart des accéléromètres Brüel & Kjær sont enrobés de téflon imperméable pour utilisation dans les environnements les plus humides. Pour plus de détails, voir paragraphe 4.2.5. Pour des informations précises sur la gamme de câbles disponibles, y compris les câbles intégrés et les câbles en spirale, voir les fiches techniques des accéléromètres d'usage général et des accéléromètres industriels de Brüel & Kjær.

Les accéléromètre Line-Drive ne nécessitent qu'un seul câble pour la transmission des signaux vibratoires et l'alimentation. On emploie souvent les câbles à deux conducteurs car ils sont beaucoup moins coûteux que les câbles d'accéléromètre à faible bruit. On devrait souligner qu'une tension est induite dans le câble lors de l'emploi d'un accéléromètre Line-Drive dans un environnement électromagnétique. Cette tension correspond au bruit de boucle de masse

décrit paragraphes 3.6.3, 3.6.4 et 3.6.6. Celles-ci démontrent que les systèmes Line-Drive de Brüel & Kjær sont mieux protégés contre les boucles de masse que les systèmes dépendant de sources d'alimentation en courant constant. Cependant, dans les environnements industriels sévères, on recommande toujours l'emploi de câbles coaxiaux avec les amplificateurs Line-Drive. Dans des environnements moins sévères, on a tout simplement recours aux câbles à deux conducteurs torsadés.

4.7. PRÉCAUTIONS POUR MISE À LA MASSE

Dans les montages de mesures vibratoires multi-voies, on rencontre souvent des problèmes liés à l'existence de petits courants entre les fils de masse de l'équipement de mesure. Ce phénomène est dû au fait que le montage est mis à la masse en plusieurs points de potentiels différents.

La mise à la masse se fait à partir de la borne masse de l'instrument de mesure. Le boîtier d'un accéléromètre sert aussi bien de point de mise à la masse lorsqu'il est monté sur une structure elle-même mise à la masse. Cependant, dans certains milieux industriels, il est toujours possible que le bâti d'une machine ne soit pas au potentiel terre et qu'il le dépasse même de plusieurs volts. Ce problème se pose soit parce que la machine manque de connexion masse appropriée, soit parce que l'impédance de cette connexion masse n'est pas nulle.

Les blindages des câbles connecteurs sont souvent reliés au châssis et au boîtier d'un instrument de mesure lui-même mis à la masse. Ainsi, lorsque les boîtiers se touchent, les courants de boucle de masse circulent d'un instrument à l'autre à travers le blindage des câbles ou à travers les châssis des instruments.

Les boucles de masse se manifestent sous forme d'un «bourdonnement» secteur que l'on détecte au niveau du dernier point de mesure et qui affecte le signal vibratoire à la sortie. On obtient ainsi des niveaux vibratoires erronés. La solution à ce problème est de «casser» la boucle dans laquelle circule le courant. On y parvient de plusieurs manières.

1. S'assurer que l'équipement de mesure n'est mis à la masse qu'en un seul point de la chaîne de mesure, et que cette connexion masse soit fiable.
2. Choisir un préamplificateur de charge doté de l'option d'isolation du blindage du câble d'entrée vis-à-vis du fil masse du préamplificateur. On parle ici d'«entrée flottante». Consulter le paragraphe 3.6 pour une analyse détaillée du captage de bruit dans les préamplificateurs.
3. Monter l'accéléromètre à l'aide d'un goujon isolant.

Dans les environnements industriels, on conseille d'utiliser un accéléromètre à sortie bipolaire et électriquement isolé, avec amplificateur différentiel. Cette conception d'accéléromètre réduit les effets de captage électromagnétique dans le câble. Dans ce cas, le câble contient deux conducteurs isolés, chacun avec un blindage individuel. Tous deux captent la même interférence. Le pré-amplificateur différentiel fournit une sortie proportionnelle au *signal de différence* dans ces conducteurs. Ce signal de différence, grâce à la conception de l'accéléromètre à sortie bipolaire, élimine l'effet des interférences électromagnétiques. Une telle conception réduit aussi les effets de tensions de boucle de masse.

5. ÉTALONNAGE ET ESSAIS D'ACCELÉROMÈTRES

5.1. INTRODUCTION

La précision, la fiabilité et la souplesse d'emploi de l'accéléromètre piézoélectrique seraient presque inutiles si les mesures de vibrations n'étaient pas comparées à des grandeurs standard absolues. Le but d'un étalonnage est de garantir une marge de confiance bien définie pour toute mesure de vibrations. Les essais effectués sur les accéléromètres donnent de nombreux renseigne-

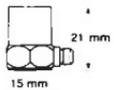
Calibration Chart for Accelerometer Type 4383			Environmental:
Serial No. <u>1230172</u>	Brüel & Kjær		Humidity: Welded, Sealed Temperature Range: -74 to +250°C (-100 to +482°F) Max. Shock Acceleration: 20kms ⁻² peak Typical Magnetic Sensitivity (50 Hz - 0,03 T): 1 ms ⁻² /T Typical Acoustic Sensitivity: 0,002 ms ⁻² at 154 dB SPL (2 - 100 Hz) Typical Base Strain Sensitivity (at 250 µε in base plane): 0,01 ms ⁻² /µε Typical Temperature Transient Sensitivity (3Hz LLF): 0,1 ms ⁻² /°C Specifications obtained in accordance with ANSI S2.11-1969
Reference Sensitivity at 50Hz, 100ms⁻² and <u>23</u> °C			Physical:
Charge Sensitivity* <u>3,12</u> pC/ms ⁻² or <u>30,5</u> pC/g			
Voltage Sensitivity* (incl. AO 0038) <u>2,75</u> mV/ms ⁻² or <u>26,9</u> mV/g (Voltage Preamp. input Capacitance: 3,5 pF)			
Capacitance (incl. cable) <u>1134</u> pF			Electrical Connector: Coaxial 10 - 32 UNF-2A
Typical Capacitance of cable AO 0038 110 pF			
Maximum Transverse Sensitivity (at 30Hz, 100ms ⁻²) <u>1,8</u> %			
Typical Undamped Natural Frequency 51 kHz			
Typical Transverse Resonance Frequency , using Exciter Table 4290, with accelerometer mounted on a titanium cube by a 10 - 32 UNF-2A steel stud, mounting torque 1,8Nm and greased surfaces: 10 kHz			
Polarity is positive on the center of the connector for an acceleration directed from the mounting surface into the body of the accelerometer			
Resistance minimum 20.000MΩ at room temperature			
Date: <u>86.01.10</u> Signature: <u>J.A.</u>			
1 g = 9,807 ms ⁻² or 10 ms ⁻² = 1,02g			
* This calibration is traceable to the National Bureau of Standards Washington D.C.			
BC 0163-12			Pat DK 131401

Fig. 5.1. Fiche d'étalonnage. Cette partie décrit les spécifications pour étalonnage individuel et par lot

ments sur l'environnement de fonctionnement et les limites entre lesquelles l'étalonnage est valide.

Chaque accéléromètre produit par Brüel & Kjær est soumis aux techniques de contrôle de production et de qualité les plus strictes afin que soient garanties la fiabilité des capteurs et la similarité entre les accéléromètres de même type. Les accéléromètres sont alors étalonnés individuellement afin de fournir des informations précises sur divers paramètres.

Souvent, lorsqu'on parle d'étalonnage, on fait essentiellement allusion à l'étalonnage de sensibilité. Cependant, d'autres paramètres comme la réponse fréquentielle, la capacité, la masse et les effets environnementaux sont autant d'informations sur l'étalonnage. Chaque accéléromètre est livré avec sa propre fiche d'étalonnage. Celle-ci renferme un maximum d'informations dont quelques unes sont spécifiques à l'accéléromètre concerné, alors que d'autres se rapportent au type d'accéléromètre. Voir Figs. 5.1, 5.2, et 5.3.

Il n'est pas du ressort de ce chapitre de livrer un guide détaillé sur les procédures d'étalonnage. Les Manuels d'instructions propres à l'équipement d'étalonnage fournissent ce genre d'informations. Toutefois, ce chapitre donne un bref aperçu sur l'étalonnage et les essais d'accéléromètres Brüel & Kjær.

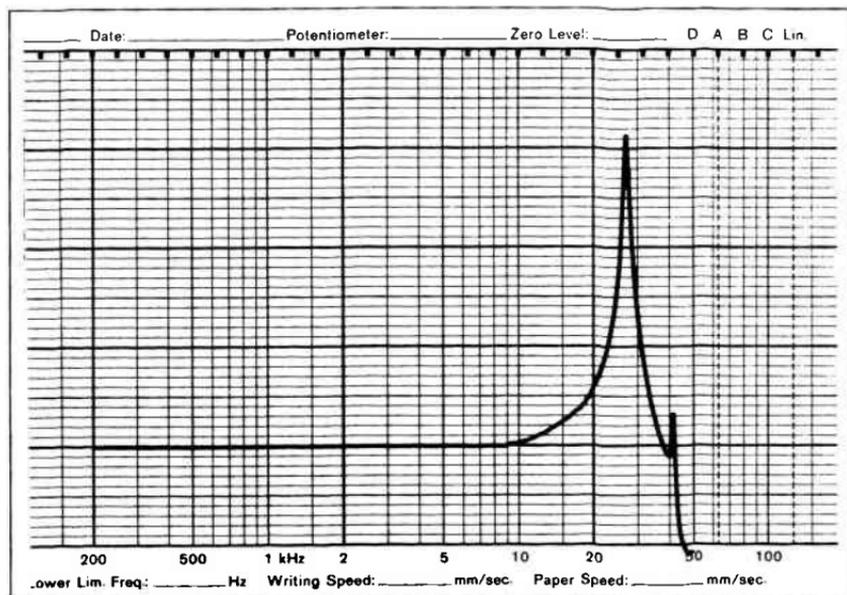
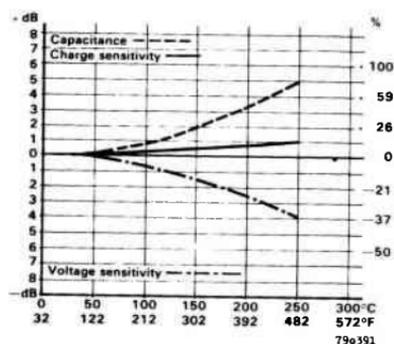


Fig. 5.2. Fiche d'étalonnage. Cette partie montre une courbe individuelle de réponse fréquentielle

Typical Temperature Sensitivity Deviation:
(Piezoelectric Material PZ23)



Mounting Technique:

Examine the mounting surface for cleanliness and smoothness.

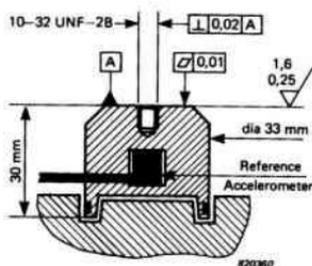
If necessary, machine surface to tolerances shown in schematic drawing of Calibration Exciter 4290.

Fasten the 4383 using a 10 - 32 UNF-2A stud. Take care not to exceed the recommended mounting torque and that the stud does not bottom in the mounting holes.

A thin film of oil or grease between the accelerometer and the mounting surface helps achieve good contact and improves mounting stiffness.

For other types of mounting, see B & K "Piezoelectric Accelerometer and Preamplifier" handbook.

Schematic Drawing of Exciter 4290:
(Modified laboratory reference)



Material: Stainless steel

Mass of Exciter table: 180 gram

Mounted Resonance Frequency obtained on the Exciter 4290 using the recommended mounting technique is shown on the attached individual **Frequency Response Curve**.

Fig. 5.3. Fiche d'étalonnage. Cette partie renferme des informations d'ordre général

5.1.1. Pourquoi étalonner un accéléromètre?

Il existe plusieurs raisons d'effectuer un étalonnage en plus de celle consistant en l'établissement d'une relation avec une grandeur physique, sous un degré de précision définissable. Dans plusieurs cas, on peut avoir des raisons légales ou contractuelles créant des demandes quant à la précision du capteur, conformes à des normes internationales.

On peut avoir des situations où l'accéléromètre est utilisé dans un montage particulier ou dans un environnement où la performance de l'accéléromètre n'est pas spécifiée sur sa fiche d'étalonnage. Dans cette perspective, l'utilisateur doit effectuer un étalonnage spécifique à une situation particulière. Une fiche d'étalonnage est d'ailleurs suffisamment complète pour couvrir la plupart des applications.

Le contrôle de systèmes constitue aussi une partie importante du processus d'étalonnage, particulièrement pour les systèmes de mesure constitués de plusieurs instruments. On évite les erreurs liées au calcul de la sensibilité

globale du système simplement en recourant à un contrôle d'étalonnage rapide. Voir paragraphe 5.3.5.

Avant d'étalonner un accéléromètre, on conseille de s'assurer de son bon fonctionnement en mesurant sa réponse fréquentielle. Une détérioration peut être détectée sous forme d'irrégularités dans la réponse fréquentielle de l'accéléromètre, impliquant que celui-ci est inutilisable ou, au mieux, que la gamme fréquentielle est limitée. Si c'est le cas, l'étalonnage n'a alors plus aucune signification. La mesure de la réponse fréquentielle d'un accéléromètre est couverte paragraphe 5.4.2.

5.2. HIÉRARCHIE DES NORMES D'ÉTALONNAGE

5.2.1. Hiérarchie générale

Afin d'éviter la nécessité d'effectuer un étalonnage absolu pour chaque capteur, une hiérarchie de capteurs standard est initialement établie. Voir Fig. 5.4.

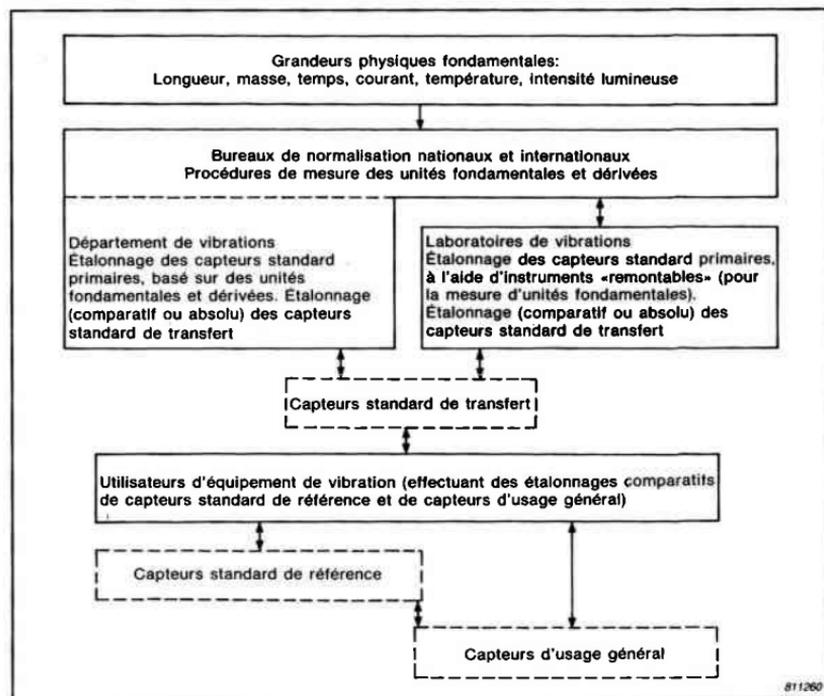


Fig. 5.4. Hiérarchie des capteurs standard

Les capteurs standard sont répartis en trois groupes.

- 1. Capteurs standard primaires.** Par définition, une méthode d'étalonnage établissant la sensibilité d'un capteur en fonction d'unités fondamentales ou dérivées, est connue sous le nom de méthode *absolue*. Un capteur étalonné de cette manière est un capteur standard primaire et se place à la tête de la hiérarchie. De tels capteurs sont conservés dans les bureaux de normalisation nationaux ou internationaux, ou dans les laboratoires où ils ont été étalonnés.
- 2. Capteurs standard de transfert.** Ces capteurs sont étalonnés par les bureaux et laboratoires cités plus haut. On les étalonne soit par méthode *comparative*, à l'aide d'un capteur standard primaire, soit par méthode *absolue*.

Les capteurs standard de transfert sont échangés et réétalonnés entre les bureaux de normalisation pour établir une cohérence entre ces bureaux. On peut donc remonter la chaîne d'étalonnage et déterminer quel bureau de normalisation est responsable de l'établissement de la cohérence de l'étalonnage effectué par un laboratoire. Ainsi, l'étalonnage d'un capteur par tel laboratoire remonte jusqu'à tel bureau de normalisation.

- 3. Capteurs standard de référence.** Ces capteurs sont employés pour l'étalonnage comparatif des capteurs d'usage commun. Les capteurs standard de référence sont étalonnés par les bureaux de normalisation ou les laboratoires d'étalonnage utilisant les méthodes *absolue* ou *comparative*. Ils sont contrôlés par comparaison aux capteurs standard de transfert. Ainsi, on peut toujours remonter l'étalonnage des capteurs d'usage général.

5.2.2. Hiérarchie chez Brüel & Kjær

L'étalonnage des accéléromètres Brüel & Kjær commence avec l'Accéléromètre de référence Type 8305 (voir Fig. 5.5).

Il s'agit d'un accéléromètre piézoélectrique basé sur un montage à compression centrale inversée. L'élément piézoélectrique est un cristal de quartz PZ 100 soigneusement sélectionné et préparé, et choisi pour sa faible sensibilité aux fluctuations thermiques et son excellente stabilité sur de longues périodes de temps. Un trou taraudé présent sur la partie supérieure du 8305 permet le montage d'autres accéléromètres pour étalonnage «dos-à-dos» (voir paragraphe 5.3.3).

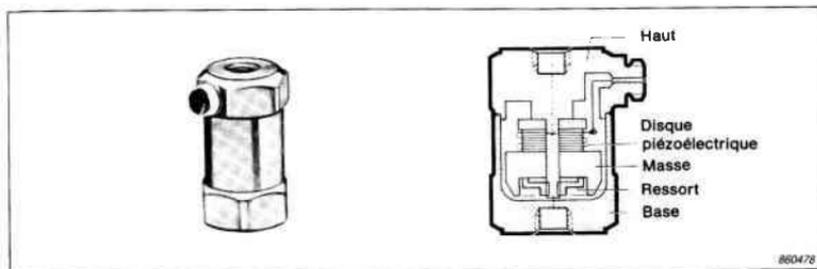


Fig. 5.5. Accéléromètre de référence Type 8305

Chaque Accéléromètre Type 8305 est étalonné par interférométrie laser (voir paragraphe 5.3.1). De plus, l'Ensemble d'étalonnage Type 3506, constitué d'un 8305 et d'un Amplificateur conditionneur Type 2626, est étalonné avec la même technique (voir Fig. 5.6).

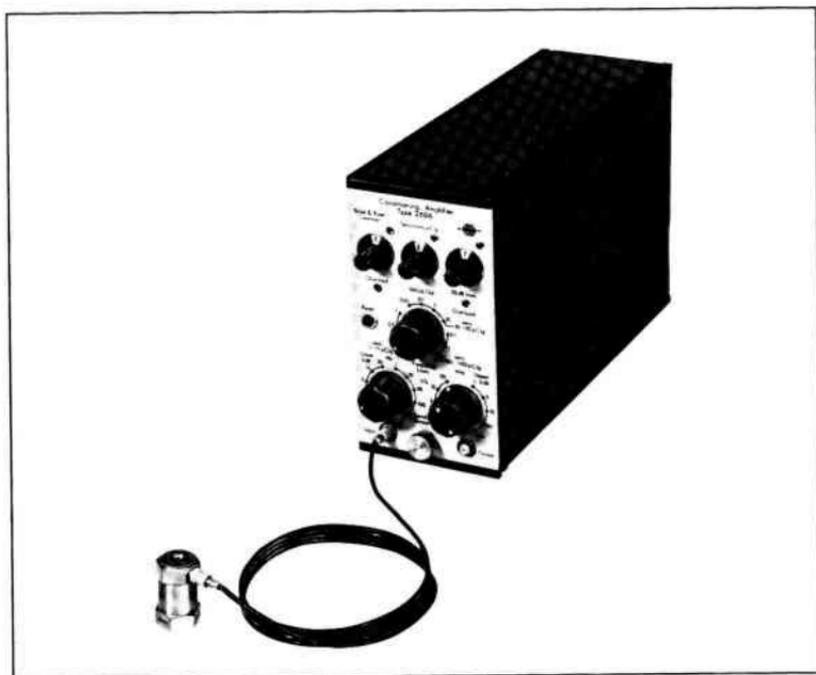


Fig. 5.6. Ensemble d'étalonnage Type 3506

Le laboratoire d'étalonnage de Brüel & Kjær envoie régulièrement deux 3506 au National Bureau of Standards (NBS) aux États-Unis à des intervalles réguliers. Ces instruments standard de transfert sont toujours transportés au NBS à la main en préférence aux courriers ordinaires. Cette procédure garantit la cohérence de l'étalonnage par interférométrie de Brüel & Kjær et permet de remonter tous les 8305 au NBS.

On garde au Danemark un ensemble d'accéléromètres standard primaires ainsi qu'un ensemble de prototypes supplémentaires en prévention de la détérioration de l'un des capteurs standard primaires.

Le reste de la gamme d'accéléromètres Brüel & Kjær est étalonné par un système semi-automatique de comparaison «dos-à-dos» qui emploie un 8305 comme capteur standard de référence.

Une collection de prototypes de transfert est établie pour le contrôle des systèmes d'étalonnage à travers le monde, dans les antennes de maintenance de Brüel & Kjær et dans d'autres laboratoires d'étalonnage. Ici, tous les types d'accéléromètres sont étalonnés pour le client par la méthode «dos-à-dos» employant le Système d'étalonnage Type 9559 (voir paragraphe 5.7.1). On peut d'ailleurs étalonner d'autres paramètres avec ce même système.

C'est en ce sens qu'on a développé chez Brüel & Kjær une hiérarchie d'étalonnage efficace pouvant contrôler le processus d'étalonnage non seulement lors de la fabrication, mais aussi plusieurs années après l'achat de l'accéléromètre, tout en conservant la possibilité de remonter son étalonnage. Voir Fig. 5.7.

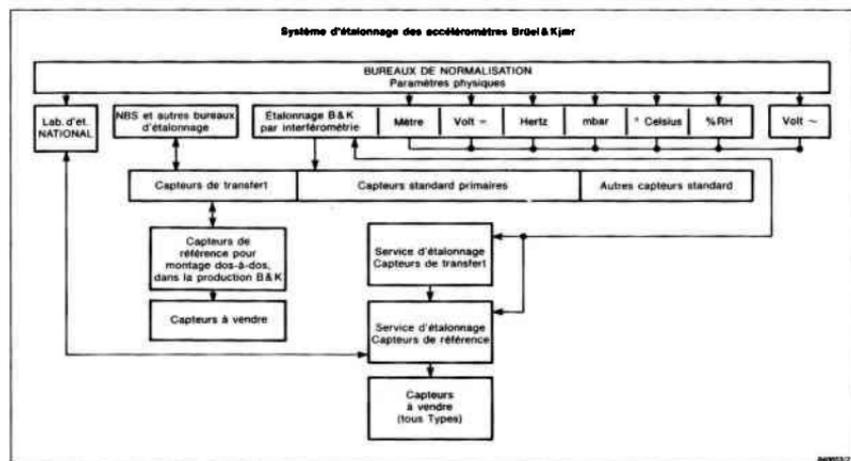


Fig. 5.7. Hiérarchie d'étalonnage chez Brüel & Kjær

5.2.3. Précision des techniques d'étalonnage

Il est important d'assimiler la différence entre le «remontage» et la précision. Le remontage implique seulement qu'il existe une cohérence avec l'étalonnage effectué dans un bureau de normalisation, et que l'étalonnage se trouve dans les limites de tolérance. Ceci veut dire que si un laboratoire d'étalonnage employait des instruments plus précis que ceux du bureau de normalisation auquel il se rapporte, l'incertitude de l'étalonnage effectué par le laboratoire serait inférieure à celle du bureau de normalisation.

Pour évaluer la précision des diverses méthodes d'étalonnage, l'incertitude de l'étalonnage doit être traitée d'une manière cohérente. Chez Brüel & Kjær, on a adopté la méthode décrite dans le Document guide No. 3003 du British Calibration Service. Ce document décrit une méthode attribuant une valeur d'incertitude unique (\pm) à la mesure, ainsi qu'une assurance, en termes de probabilité, que la vraie valeur de la mesure se trouve entre les deux limites (\pm) spécifiées. Pour des raisons pratiques, les contributions à l'incertitude d'étalonnage sont classées en deux catégories

- a) incertitude aléatoire
- b) incertitude systématique

Examinons maintenant les incertitudes résultantes de l'emploi des méthodes d'étalonnage *absolue* et *comparative*.

Méthode absolue. Grâce à l'interférométrie laser, on peut théoriquement déterminer l'amplitude vibratoire avec une précision de 0,02%. En réalité, les erreurs de mesure se produisent dans les mesures de tension (0,1%), dans la distorsion du mouvement de l'excitateur de vibration (0,1%), dans l'inclinaison de l'accéléromètre de référence (0,2%) et dans les mouvements transversaux de ce dernier (0,1%). On a estimé l'incertitude de l'étalonnage absolu de l'Ensemble d'étalonnage Type 3506 et de l'Accéléromètre de référence Type 8305 à 0,6%, avec un intervalle de confiance de 99%.

Méthode comparative. Employée par le NBS pour tester les prototypes de transfert et par Brüel & Kjær pour étalonner sa gamme d'accéléromètres. Cette méthode résulte en une incertitude totale meilleure que 0,95%, à ajouter à celle de l'étalonnage absolu de l'Ensemble d'étalonnage Type 3506, pour obtenir une erreur globale propre à cette méthode estimée à 1,12%, avec un intervalle de confiance de 99%.

On doit se rappeler que ces valeurs reposent sur l'utilisation d'un système d'étalonnage par interférométrie qui est une méthode absolue. Cependant, le système de comparaison NBS est d'une précision de 1%. Ainsi, si les valeurs NBS se rapportant à la précision du 3506 sont utilisées, l'incertitude globale estimée de la méthode comparative s'élève à 1,38%, avec un intervalle de confiance de 99%.

5.3. MÉTHODES D'ÉTALONNAGE

On étalonne les sensibilités selon trois méthodes distinctes.

1. Méthode absolue: inclut les techniques d'interférométrie laser et de réciprocité.
2. Méthode comparative: représente la méthode «dos-à-dos».
3. Étalonneurs: implique l'emploi d'un excitateur de vibrations dont on a déterminé le niveau vibratoire.

5.3.1. Interférométrie laser

Cette méthode absolue implique l'utilisation d'instruments très sophistiqués. C'est pourquoi il est très peu probable que l'utilisateur d'accéléromètres n'ait recours à un étalonnage de ce genre.

La Fig. 5.8 montre la disposition adoptée chez Brüel & Kjær lors de l'étalonnage de l'Accéléromètre de référence Type 8305 et de l'Ensemble d'étalonnage Type 3506.

La chaîne de mesure est répartie autour d'un interféromètre Michelson. Un rayon laser est dirigé vers la surface supérieure de l'accéléromètre de référence à étalonner, à partir de laquelle le rayon laser est réfléchi sur la même trajectoire. Le séparateur de faisceau (miroir plan semi-réfléchissant) de l'interféromètre est situé sur cette trajectoire et dirige une partie du rayon réfléchi par l'accéléromètre vers un photodétecteur. L'autre partie du rayon réfléchi atteint le photodétecteur via le miroir fixe et le séparateur de faisceau de l'interféromètre, générant ainsi des franges au niveau du photodétecteur. Celui-ci détecte une succession de minimums et de maximums d'intensité liés aux vibrations de l'accéléromètre. La sortie est amplifiée puis appliquée à l'entrée d'un compteur de franges par période, lequel affiche une valeur proportionnelle au déplacement crête-à-crête de l'accéléromètre.

La sortie d'un Générateur sinusoïdal Type 1023 est employée comme horloge externe du compteur de franges par période. On ajuste l'amplitude vibratoire jusqu'à ce que le nombre de franges par période affiché soit correct. Aussi, on mesure la sortie électrique de l'accéléromètre à l'aide d'un amplificateur conditionneur et d'un voltmètre différentiel, tous deux déjà calibrés.

La partie interféromètre de ce montage mesure le déplacement crête-à-crête du 8305. De là, on peut obtenir la sensibilité de l'accéléromètre en divisant sa sortie électrique par son accélération.

Chez Brüel & Kjær, on utilise une fréquence d'excitation de 160 Hz et un niveau d'accélération de 10ms^{-2} .

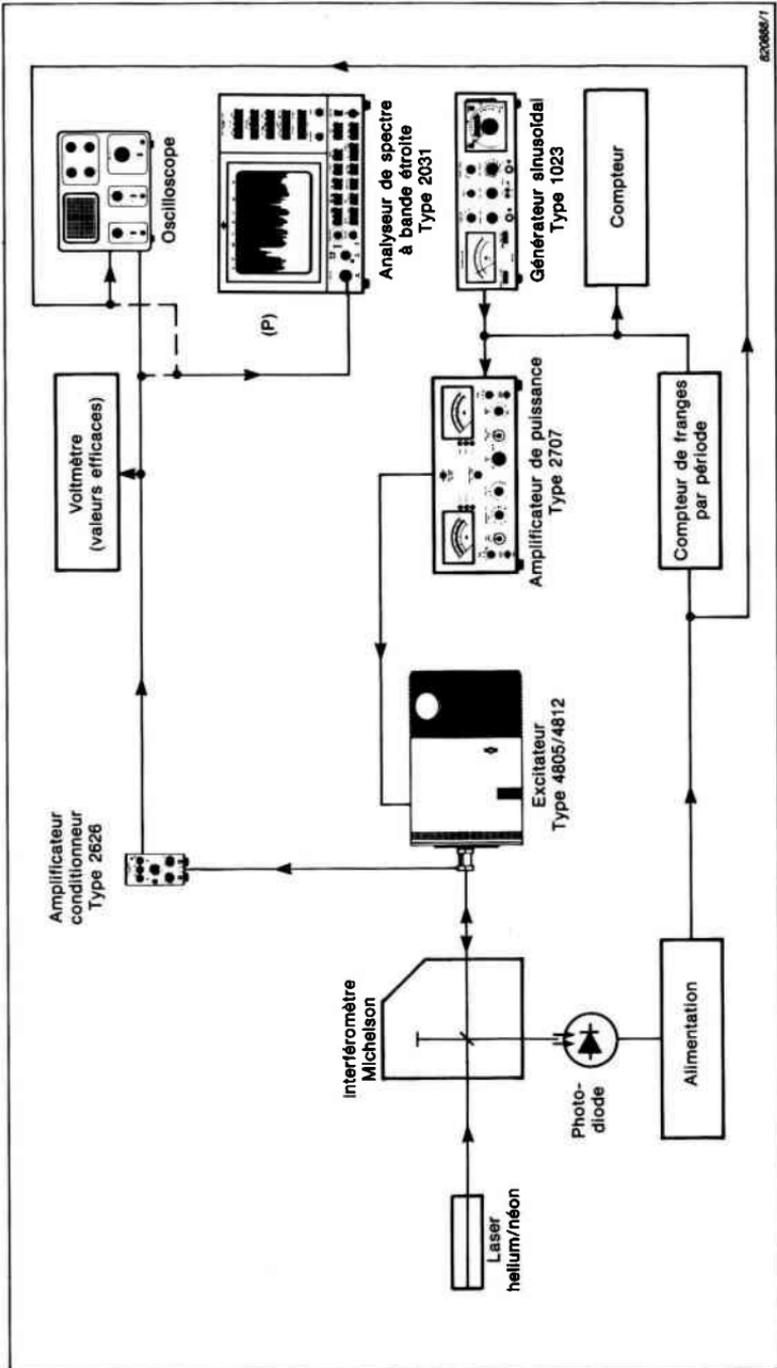


Fig. 5.8. Montage d'interférométrie laser utilisé chez Brùel & Kjær

5.3.2. Autres méthodes absolues

Il existe d'autres méthodes d'étalonnage absolues. Elles ne sont pas utilisées par Brüel & Kjær et ne sont par conséquent que brièvement décrites.

1. Étalonnage par réciprocité. Récemment, cette méthode était encore présentée dans la littérature Brüel & Kjær comme une méthode absolue pouvant être employée par tout utilisateur possédant un équipement de base non sophistiqué. Cette méthode est très compliquée et de bons résultats sont difficiles à obtenir.
2. Étalonnage par gravité. Dans cette méthode, on fait tourner l'accéléromètre dans un cercle vertical, de telle façon que seule la gravité agit sur l'accéléromètre. Cette méthode n'est pratique qu'en basse fréquence, et fait parfois appel à des accéléromètres statiques (DC); c'est pourquoi elle n'est pas utilisée par Brüel & Kjær.

5.3.3. Étalonnage comparatif par la méthode «dos-à-dos»

La méthode dos-à-dos est utilisée pour l'étalonnage en usine de toute la gamme d'accéléromètres de mesure que produit Brüel & Kjær. On y emploie un système semi-automatique pouvant être facilement conçu par quiconque souhaiterait effectuer ses propres étalonnages comparatifs.

On monte l'accéléromètre dont la sensibilité est à mesurer dos-à-dos avec l'Accéléromètre de référence Type 8305. Puis l'ensemble est lui-même monté sur une source vibratoire appropriée. Puisque l'accélération d'entrée est la même pour les deux accéléromètres, le rapport de leurs sorties électriques est le même que celui de leurs sensibilités.

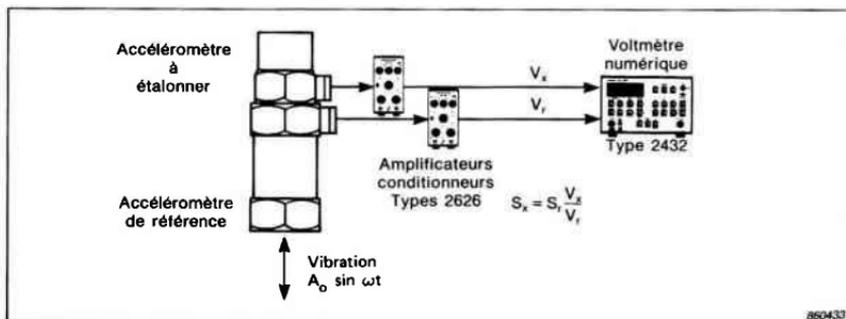


Fig. 5.9. Disposition simple pour étalonnage «dos-à-dos» des accéléromètres

Le Corps d'excitateur Type 4801 ou 4805 muni de la Tête d'étalonnage Type 4815 est conçu pour l'étalonnage dos-à-dos. Le 4815 est doté d'un Accéléromètre de référence Type 8305 incorporé. Voir fiche technique correspondante pour plus de détails.

La Fig. 5.9. montre la disposition dos-à-dos dans sa forme la plus simple. On excite les accéléromètres à une fréquence constante et l'on injecte leurs sorties à des amplificateurs (fonctionnant en mode tension ou charge, dépendant de l'intérêt porté sur la sensibilité en tension ou en charge). Leurs sorties amplifiées sont alors mesurées individuellement à l'aide d'un Voltmètre numérique Type 2432, dont la précision est spécifiée.

On peut améliorer le système précédent en utilisant un Comparateur de sensibilité Type 2970 (voir Fig. 5.10). En adaptant la sensibilité de l'amplificateur conditionneur à celle de l'accéléromètre inconnu, on obtient une déviation minimale sur le 2970. La sensibilité est alors lue à partir de l'amplificateur conditionneur.

Le 2970 accomplit les fonctions suivantes:

1. Simplifie la comparaison des sorties.

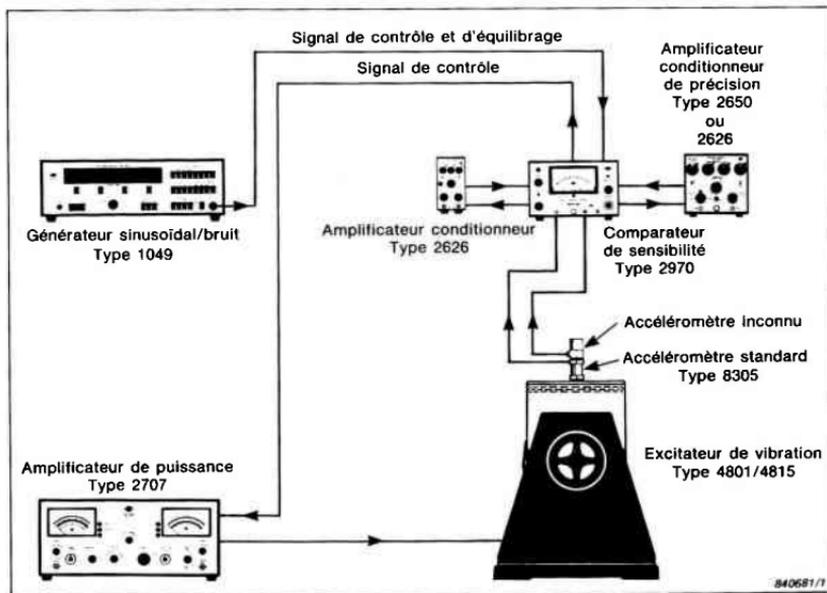


Fig. 5.10. Montage de haute précision pour étalonnage dos-à-dos réparti autour d'un Comparateur de sensibilité Type 2970

2. Diminue la durée de la procédure.
3. Donne une précision d'étalonnage similaire à celle obtenue par les ateliers de Brüel & Kjær et à celle du NBS.
4. Effectue des conversions tension/charge pour les étalonnages en tension et en charge.

La fréquence et le niveau d'accélération de l'étalonnage varient en fonction des normes auxquelles on se réfère. Chez Brüel & Kjær, les accéléromètres de mesure sont étalonnés à une fréquence de 160 Hz et à un niveau d'accélération de 100 ms^{-2} . On ne peut utiliser le 2970 que dans la gamme fréquentielle allant de 60 à 250 Hz.

Peu importe, en réalité, à quels niveaux ou fréquences on étalonne un accéléromètre pourvu que ces niveaux et fréquences soient bien à l'intérieur de la gamme de fonctionnement de l'accéléromètre. Après tout, les accéléromètres sont des instruments extrêmement linéaires dans leurs gammes fréquentielles et dynamiques. On a vu, paragraphe 2.5.2, que les sensibilités en charge des accéléromètres d'usage général Brüel & Kjær employant les éléments piézoélectriques PZ 23 et PZ 27 décroissaient à un taux de 2,5% par augmentation de la fréquence d'une décade. C'est pourquoi l'on doit tenir compte de cet effet lorsque la sensibilité à une fréquence différente est requise. Par exemple, la différence entre 50 Hz et 160 Hz est d'environ 1,3%.

Lorsque l'on mesure des sensibilités en tension, on doit se rappeler que la sensibilité en tension n'est valide que pour la paire accéléromètre/câble et que ceux-ci sont étalonnés ensemble. Si le câble est remplacé, l'étalonnage n'est plus valide.

5.3.4. Étalonnage dos-à-dos reposant sur l'analyse FFT

On peut procéder à un étalonnage dos-à-dos en utilisant la transformée de Fourier rapide (FFT). En employant un Analyseur bicanal Type 2032 ou 2034, il est possible d'appliquer un bruit de bande large à l'excitateur de vibrations. Les sorties de l'accéléromètre à étalonner et de l'accéléromètre de référence sont alors transmises aux deux voies de l'analyseur. Celui-ci calcule une fonction de réponse fréquentielle. Après intégration, il est possible de répondre à des questions se rapportant à la sensibilité et à la phase relative de l'accéléromètre à étalonner sur une large gamme fréquentielle.

Comme avec tous les montages, la précision de l'étalonnage final dépend des précisions individuelles de chacun des instruments constituant la chaîne de mesure, et de la précision de l'accéléromètre de référence à toutes les fréquences, y compris aux fréquences différentes de celle à laquelle l'accéléromètre était initialement étalonné (160 Hz). Pour plus de détails, contacter le bureau Brüel & Kjær local.

5.3.5. Emploi d'un excitateur de vibrations étalonné pour le contrôle de sensibilité

Probablement la plus pratique et la plus utilisée des techniques de contrôle de sensibilité. Toute personne effectuant des mesures de vibrations est en mesure d'employer cette méthode.

Excitateur d'étalonnage Type 4294. Ce petit instrument alimenté sur piles est tout simplement un excitateur de vibrations étalonné pour fournir un niveau d'accélération fixe de 10 ms^{-2} efficaces réf. $159,2 \text{ Hz}$ (1000 rads/s), correspondant à une vitesse de 10 mms^{-1} efficaces et à un déplacement de $10 \mu\text{m}$ efficaces, avec une précision meilleure que $\pm 3\%$. Le 4294 est idéal pour le contrôle de systèmes *in situ*. La Fig. 5.11 le montre en utilisation pour le contrôle de la sensibilité d'un accéléromètre à l'aide d'un amplificateur de mesure.

On peut utiliser le 4294 de deux manières:

1. Contrôle de la sensibilité des accéléromètres.
2. Contrôles et ajustements pour le calibrage de systèmes.

Le contrôle de la sensibilité d'un accéléromètre s'effectue tout simplement en l'attachant à la tête d'excitateur et en mesurant la sortie du préamplificateur auquel il est relié.

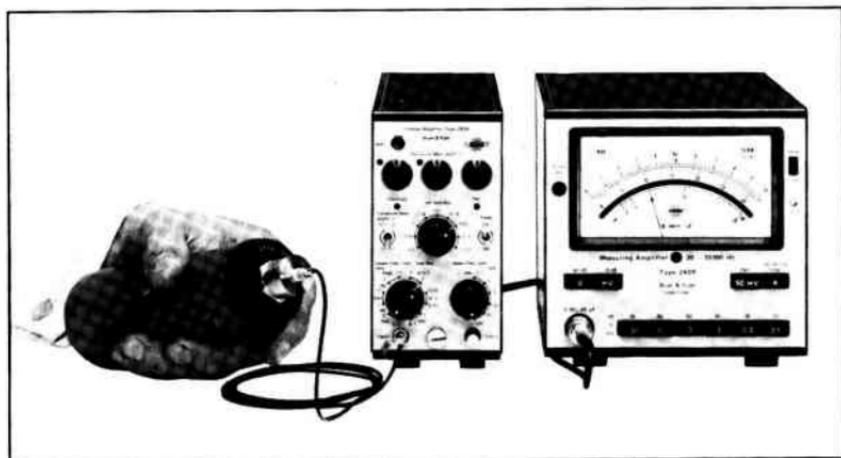


Fig. 5.11. Excitateur d'étalonnage Type 4294

Une caractéristique du 4294 particulièrement intéressante est sa capacité de calibrer une chaîne de mesure entière, de l'accéléromètre à l'analyseur. On mesure la sensibilité globale du système sans tenir compte des sensibilités individuelles des instruments constituant la chaîne.

De plus, on peut ajuster le gain sur l'un des instruments pour que la déviation pleine échelle corresponde à l'accélération de référence produite par l'excitateur.

5.4. MESURE D'AUTRES PARAMÈTRES PROPRES À L'ACCÉLÉROMÈTRE

La sensibilité d'un accéléromètre est le paramètre le plus mesuré. Elle n'est pas, cependant, le seul paramètre fréquemment mesuré pour les mesures précises de vibrations. On peut avoir besoin d'informations spécifiques aux paramètres suivants:

1. Sensibilité transversale
2. Réponse fréquentielle
3. Fréquence de résonance monté
4. Capacité

La plupart de ces paramètres sont mesurés individuellement pour chaque accéléromètre produit par Brüel & Kjær.

Les mesures de paramètres environnementaux sont couvertes paragraphe 5.5.

5.4.1. Sensibilité transversale

Chez Brüel & Kjær, on mesure la sensibilité transversale en utilisant une table vibrante spéciale, fabriquée sur commande, similaire à celle montrée Fig. 5.12. On fait vibrer horizontalement la platine sur laquelle l'accéléromètre est monté, à une accélération de 100 ms^{-2} réf. 30 Hz. Simultanément, la platine centrale de la table vibrante tourne lentement. Cela a pour effet d'affecter a direction de la vibration transversale appliquée à l'accéléromètre. On mesure la sortie de celui-ci pour déterminer ensuite la sensibilité transversale maximale. La direction de la vibration transversale minimale est indiquée par un point rouge sur la plupart des accéléromètres Brüel & Kjær.

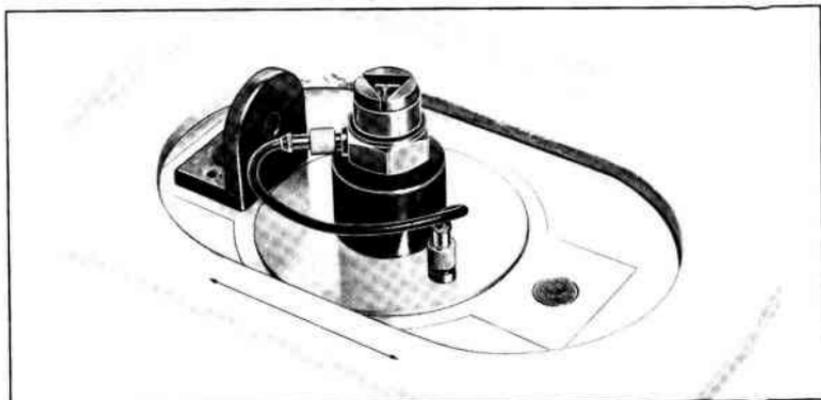


Fig. 5.12. Un exciteur spécial similaire est utilisé chez Brüel & Kjær pour mesurer la sensibilité transversale d'un accéléromètre

5.4.2. Réponse fréquentielle

La Fig. 5.13 montre un montage similaire à celui utilisé chez Brüel & Kjær pour mesurer la réponse fréquentielle de tous les accéléromètres de mesure, hormis ceux du genre miniature.

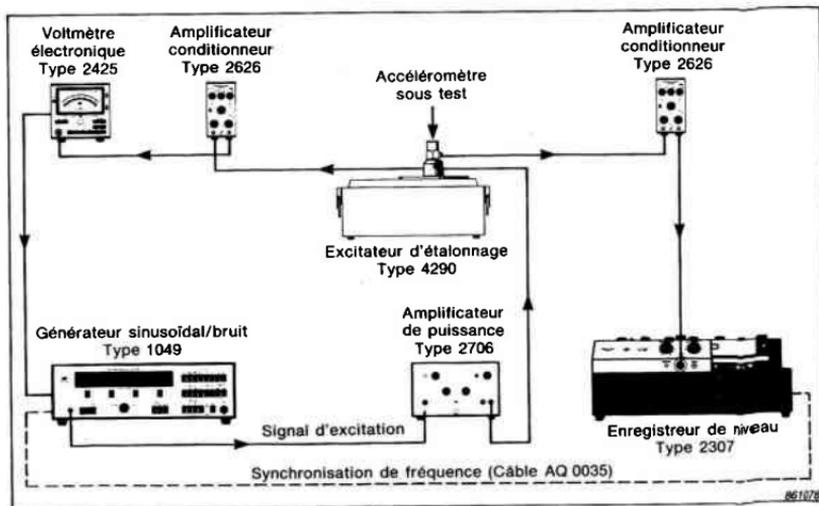


Fig. 5.13. Montage pour mesurer la réponse fréquentielle d'un accéléromètre

L'Excitateur d'étalonnage Type 4290 (voir Fig. 5.14) est alimenté par un générateur sinusoïdal sur une gamme fréquentielle allant de 200 Hz à 50 kHz. L'élément mobile du 4290 est une tête d'acier de 180 g dotée d'une surface de montage soigneusement finie, avec un trou de fixation pour monter l'accéléromètre.

On maintient l'accélération de la table constante sur la gamme fréquentielle, à l'aide d'un signal de contre-réaction. Un accéléromètre miniature incorporé à la tête d'excitation fournit un signal proportionnel à l'accélération réelle. On injecte ce signal au compresseur du générateur où il est utilisé pour stabiliser le niveau de sortie du générateur, afin que l'accélération de la tête d'excitation soit constante. La sortie de l'accéléromètre à étalonner est alors appliquée à un préamplificateur puis à un enregistreur de niveau.

Mis à part les accéléromètres miniatures et le 8310, chaque accéléromètre Brüel & Kjær est fourni avec une courbe de réponse fréquentielle individuelle enregistrée de cette manière. La fréquence de résonance monté spécifiée sur la fiche d'étalonnage peut être déterminée à partir de cette courbe. En connaissant la réponse d'un accéléromètre à une fréquence particulière, l'utilisateur n'est plus restreint à des limites fréquentielles fixes.



Fig. 5.14. Excitateur d'étalonnage Type 4290

Les points suivants sont à mémoriser lors des mesures de réponse fréquentielle à l'aide de cette technique:

1. La qualité du montage d'un accéléromètre sur la tête d'excitation est très importante. Un montage de pauvre qualité peut entraîner des erreurs déroutantes dans la courbe de réponse fréquentielle. Pour plus de détails, voir paragraphe 4.4.
2. Une accélération constante de la tête d'excitateur n'est pas possible à moins qu'il y ait un gain suffisant dans la boucle de contre-réaction. On suggère de vérifier que l'accélération au niveau de la tête d'excitation soit constante sur la gamme fréquentielle de mesure. On y parvient en injectant la sortie de l'accéléromètre de référence à l'enregistreur de niveau via son préamplificateur, et en ajustant le gain du préamplificateur et la vitesse du compresseur du générateur. Cette méthode est décrite dans le Manuel d'instructions du générateur sinusoïdal.
3. Au-delà de 30 kHz, la précision avec laquelle le compresseur maintient une accélération constante au niveau de la tête d'excitateur empire rapidement. Cependant, la gamme allant jusqu'à 50 kHz permet un contrôle fiable de la fréquence de résonance montée.

5.4.3. Fréquence naturelle non amortie

Ce paramètre est de peu d'importance dans les mesures de vibrations. Toutefois, il est mentionné dans la fiche d'étalonnage car il s'agit d'un paramètre fondamental de l'accéléromètre. Il existe deux méthodes pour le mesurer.

L'accéléromètre est suspendu par son câble et excité électriquement par une source de tension couplée avec un condensateur de 1 nF. La fréquence naturelle non amortie est définie comme la fréquence à laquelle la tension et le courant dans l'accéléromètre sont en phase. On obtient une approximation en surveillant les tensions aux bornes du condensateur et de l'accéléromètre, et en trouvant la fréquence à laquelle il y a un déphasage de 90° entre les deux. On y parvient facilement en utilisant un montage similaire à celui montré Fig. 5.15. Dans ce montage, on emploie un oscilloscope pour surveiller simultanément ces deux quantités. En ajustant la fréquence d'excitation, une courbe de Lissajous se forme lorsque la fréquence en question est finalement déterminée.

Dans la seconde méthode, l'accéléromètre est encore une fois suspendu par son câble, mais cette fois on lui donne un choc mécanique en frappant légèrement sa base. Le signal de l'accéléromètre est transmis, à travers un préamplificateur de charge, à un oscilloscope à mémoire qui trace les oscillations décroissantes. En mesurant la période d'une oscillation de cette réponse et en prenant son inverse, on obtient la fréquence naturelle non amortie.

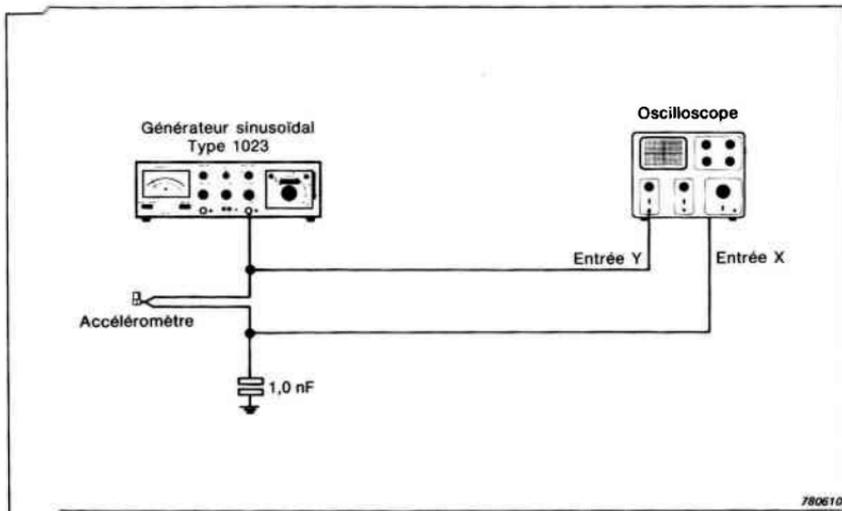


Fig. 5.15. Montage pour mesurer la fréquence naturelle non amortie d'un accéléromètre

5.4.4. Capacité

La capacité d'un accéléromètre peut être définie comme le rapport de sa sensibilité en charge à sa sensibilité en tension et peut être calculée à partir de ces deux étalonnages. Voilà comment on obtient la valeur indiquée sur la fiche d'étalonnage.

Si la capacité est mesurée avec un pont capacitif à une fréquence de 1000 Hz, on obtient une valeur tout à fait différente de celle calculée avec la méthode précédente. Ceci est dû au fait que la capacité des éléments piézoélectriques décroît à raison de 2,5% par décade fréquentielle. La tension de mesure peut aussi différer.

La capacité typique mentionnée sur la fiche d'étalonnage inclut les effets de tout câble fourni pour utilisation avec l'accéléromètre. Pour calculer la capacité du seul accéléromètre, il est nécessaire de soustraire les effets de capacité de câble dont on peut trouver la valeur typique sur la fiche d'étalonnage.

5.5. DÉTERMINATION DES EFFETS ENVIRONNEMENTAUX SUR LES SPÉCIFICATIONS DE L'ACCÉLÉROMÈTRE

La fiche d'étalonnage de l'accéléromètre renferme un paragraphe donnant des détails sur la sensibilité de l'accéléromètre aux phénomènes environnementaux. Ce paragraphe se rapporte aux méthodes utilisées chez Brüel & Kjær pour déterminer cette sensibilité.

5.5.1. Sensibilité aux transitoires thermiques

On mesure cette sensibilité en montant un accéléromètre sur un bloc d'aluminium dont la masse est environ dix fois celle de l'accéléromètre. Ensuite, on immerge lentement le tout dans un bac contenant de l'eau à une température 25° C plus haute que la température ambiante. On doit faire attention à ne pas induire de vibrations au montage.

Le préamplificateur est réglé sur une limite basse fréquence de 3 Hz, avec une courbe de pondération de 6 dB/octave. On mesure la sortie maximale de l'accéléromètre à l'aide d'un oscilloscope à mémoire. L'accélération requise pour produire cette sortie est calculée à partir de la sensibilité de l'accéléromètre, et divisée ensuite par la variation thermique pour obtenir la sensibilité aux transitoires thermiques.

5.5.2. Sensibilité thermique

S'il est requis une précision meilleure que 1 à 2 dB lors de mesures de vibrations à des températures très différentes de la température ambiante, on conseille l'utilisation des informations fournies dans la fiche d'étalonnage afin d'obtenir un facteur de correction. Elles sont présentées sous forme d'un graphe de variation de la sensibilité et de la capacité à partir des valeurs obtenues à la température d'étalonnage. Les sensibilités en tension et en charge ainsi que la capacité varient toutes en fonction de la température.

Pour les accéléromètres Brüel & Kjær, l'étalonnage individuel de la réponse en température n'est pas nécessaire car les matériaux piézoélectriques de même nature ont des réponses en température similaires. Les courbes de réponse en température peuvent alors être obtenues à partir de tests par lot et reportées sur toutes les fiches d'étalonnage des accéléromètres de même type.

Pour mesurer la dépendance thermique, on monte l'accéléromètre sur un excitateur de vibration spécial muni d'une tige mobile passant à travers une chambre environnementale. On monte l'accéléromètre à étalonner sur une table adaptée au bout de la tige mobile, à l'intérieur de la chambre. L'excitateur et l'accéléromètre de référence sont attachés à l'autre bout de la tige, à l'extérieur

de la chambre. La table utilisée chez Brüel & Kjær peut accueillir jusqu'à vingt accéléromètres (suivant leur taille). On effectue l'étalonnage à une basse fréquence, de telle sorte qu'il n'y ait pas de risques d'erreurs dues à la résonance de la tige ou de la table. Les mesures de dépendance thermique sont des procédures très longues, car il est essentiel d'allouer suffisamment de temps aux accéléromètres pour qu'ils atteignent leur température d'équilibre. Il ne devrait pas y avoir de gradients thermiques, ceux-ci pouvant modifier les sensibilités.

Lorsque cette technique est utilisée, la dépendance thermique de la capacité de l'accéléromètre peut être déduite de celles des sensibilités en charge et en tension.

5.5.3. Sensibilité aux contraintes de base

On mesure la sensibilité aux contraintes de base en montant l'accéléromètre à proximité du bout fixe d'une lourde poutre d'acier encastree. On attache des jauges de contrainte à la poutre autour de l'accéléromètre. Puis on fléchit la poutre pour contraindre la base de l'accéléromètre. La sortie des jauges de contrainte ainsi que celle de l'accéléromètre sont surveillées grâce à un oscilloscope à mémoire. Lorsque les contraintes retombent à un niveau de $250 \mu\epsilon$, la sortie de l'accéléromètre est mesurée et l'accélération requise pour produire une sortie équivalente est calculée. On divise cette accélération par la contrainte pour obtenir la sensibilité aux contraintes de base. Une valeur typique est donnée dans chaque fiche d'étalonnage.

5.5.4. Sensibilité acoustique

Il est difficile de mesurer avec précision la sensibilité acoustique d'un accéléromètre sans interférence mécanique provenant de la source acoustique. Chez Brüel & Kjær, l'accéléromètre est monté dans une chambre spéciale rigidement attachée à un calibre de microphone haute pression produisant un niveau de pression sonore de 154 dB dans la chambre. Cette disposition garantit une transmission minimale de vibrations à l'accéléromètre.

Les sorties de l'accéléromètre et de son préamplificateur sont injectées à un analyseur de fréquence, et le calibre est excité avec une onde sinusoïdale balayée en fréquence. À partir du spectre de la sortie de l'accéléromètre, il est possible de déterminer quelle partie du signal est due à l'excitation acoustique et quelle autre est due à la vibration transmise par le piston de la source acoustique. Normalement, la dernière partie masquera la première aux fréquences supérieures à 100 Hz. Voilà pourquoi les spécifications de sensibilité acoustique ne sont mentionnées que dans la gamme 2-100 Hz. Cependant, les résultats sont estimés valables jusqu'à des fréquences de plusieurs kHz. À ces hautes fréquences, les longueurs d'ondes sont comparables aux dimensions de l'accéléromètre.

5.5.5. Sensibilité magnétique

Voilà encore un autre paramètre difficile à mesurer avec précision. Chez Brüel & Kjær, on place l'accéléromètre au centre d'une grande bobine et on crée un champ magnétique alternatif en appliquant une tension secteur (50 Hz) à travers la bobine. Au centre de la bobine, l'induction magnétique est de 0,03 Tesla. On fixe rigidement l'accéléromètre à un lourd support de telle sorte que le mouvement de l'accéléromètre induit électromagnétiquement soit minimal. On mesure la sortie de l'accéléromètre et la convertit en une sensibilité comme dans les exemples précédents. Les points suivants sont à considérer.

1. Le courant induit dans la bague de précontrainte réagit avec le champ magnétique et l'ensemble «bague/éléments sensibles» vibre.
2. Il y a un mouvement induit des masses sismiques car elles ont une certaine perméabilité magnétique, aussi petite soit-elle.
3. Des courants sont induits dans les câbles d'accéléromètres.

Comme il n'est pas possible d'isoler les contributions individuelles de ces effets, on prend l'effet cumulé pour obtenir la sensibilité magnétique.

5.5.6. Limites thermiques

Les limites thermiques sont définies comme les températures maximale et minimale entre lesquelles on peut utiliser l'accéléromètre. Après 24 heures de «convalescence» en température ambiante, la variation d'un paramètre doit être petite et bien définie.

Chez Brüel & Kjær, on procède de la manière suivante. On place l'accéléromètre dans un four ou dans un congélateur. On effectue un contrôle complet de l'étalonnage 24 heures après avoir sorti l'accéléromètre du four ou du congélateur. On autorise une variation de sensibilité inférieure ou égale à 2%.

5.5.7. Limites de choc

On détermine les limites de choc en montant l'accéléromètre sur une machine hydraulique qui le frappe une centaine de fois, en courtes successions et à un niveau de choc déterminé. On répète cette procédure suivant les trois axes de l'accéléromètre (x,y et z), après quoi on procède à un étalonnage de la sensibilité et de la réponse fréquentielle. Le choc maximal autorisé est le plus petit choc qui, dans chaque axe, provoque une variation de la sensibilité de plus de 2%.

Si le préamplificateur utilisé avec l'accéléromètre tolère la très grande charge d'entrée lui étant appliquée, les limites de choc peuvent être considérées comme des limites de mesure. Dans le cas rare où un accéléromètre de haute sensibilité est utilisé pour la mesure de choc, sa sortie peut être réduite en employant un atténuateur de charge. Voir paragraphe 3.2.4.

5.6. CONTRÔLE EN USINE DES CÂBLES D'ACCÉLÉROMÈTRES

La Fig. 5.16 montre un montage similaire à celui employé chez Brüel & Kjær pour contrôler la performance des câbles d'accéléromètres en présence d'un faible bruit. Le câble se termine par une charge représentant un accéléromètre d'usage général alors que l'autre bout est sujet à une force de précharge. La sortie du câble est reliée à un préamplificateur de charge. On connecte alors le câble aux deux supports, alors que son point milieu est fixé sur un exciteur de vibration. On excite le câble en utilisant une vibration de bande étroite centrée à environ 80 Hz, et on mesure la sortie. Si le câble présente trop de bruit, on le rejette. Chez Brüel & Kjær, chaque Câble AO 0038 est contrôlé individuellement, et tous les autres câbles sont testés par lots.

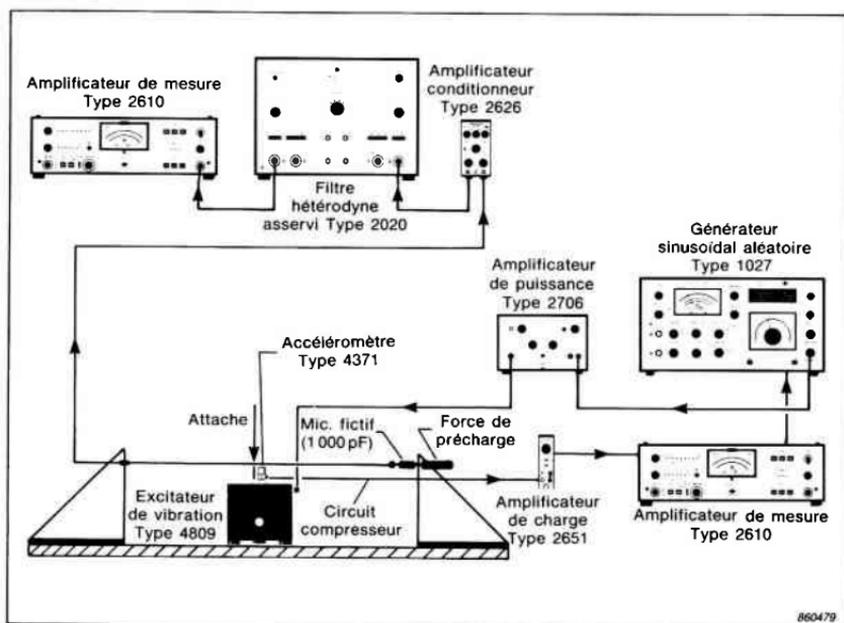


Fig. 5.16. Mesure du bruit tribo-électrique dans les câbles d'accéléromètres

5.7. ÉQUIPEMENT D'ÉTALONNAGE

5.7.1. Système d'étalonnage Type 9559

Il s'agit d'un système complet spécialement conçu pour étalonner aussi bien les accéléromètres que les microphones. Équipé d'un tel système, un laboratoire peut étalonner les paramètres fréquentiels et les sensibilités, ce qui lui permet de délivrer des certificats d'étalonnage. Voir Fig. 5.17

Le 9559 est utilisé dans plusieurs centres de réparation Brüel & Kjær à travers le monde, et se trouve à la disposition de tout organisme désireux d'effectuer des étalonnages. Il est disponible avec un guide détaillé pour l'étalonnage d'accéléromètres et de microphones. Pour plus de détails sur le 9559, adressez-vous à votre représentant Brüel & Kjær local.



Fig. 5.17. Système d'étalonnage Type 9559

5.7.2. Équipement d'étalonnage individuel

La Fig. 5.18 donne une liste des équipements d'étalonnage mentionnés dans ce chapitre.

<p>Excitateur d'étalonnage Type 4290</p> 	<p>Petit excitateur de vibration utilisé pour mesurer la réponse fréquentielle des accéléromètres. Employé avec les générateurs sinusoïdaux de B & K.</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Force max.: 3 N ■ Gamme fréquentielle: 200 Hz à 50 kHz ■ Accéléromètre incorporé pour régulation de niveau du générateur
<p>Tête d'étalonnage Type 4815</p> 	<p>Destinée principalement à l'étalonnage, dos-à-dos et par interférométrie, d'accéléromètres et autres capteurs jusqu'à des niveaux atteignant 1 000 ms⁻² (100 g).</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Accéléromètre de référence Type 8305 incorporé ■ S'adapte aux Corps d'excitateurs Types 4801 et 4805 ■ Étalonnage d'accéléromètres possible sur une gamme fréquentielle allant de 5 Hz à 10 kHz
<p>Comparateur de sensibilité Type 2970</p> 	<p>Étalonnage d'accéléromètres rapide par comparaison dos-à-dos. Utilisé avec l'Ensemble d'étalonnage Type 3506 et l'Amplificateur conditionneur de précision Type 2650</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Précision d'étalonnage: $\pm 1,02\%$ avec un niveau de confiance de 99%
<p>Excitateur d'étalonnage Type 4294</p> 	<p>Source de référence de poche pour étalonnage des systèmes de mesure employant des accéléromètres</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Niveau eff. fixe 10 ms⁻² $\pm 3\%$ à 159,2 Hz (1 000 rad/s) ■ Alimentation par pile (1 x CEI 6LF 22/9 V)
<p>Ensemble d'étalonnage Type 3506</p> 	<p>Consiste en un accéléromètre de référence Type 8305 et en un Amplificateur conditionneur Type 2626, étalonnés ensemble en usine par interférométrie laser. La précision globale estimée de cet étalonnage est meilleure que 0,6% avec un niveau de confiance de 99%. Pour utilisation dans les montages d'étalonnage d'accéléromètres</p>

T01019F0

Fig. 5.18. Liste de l'équipement d'étalonnage disponible chez Brüel & Kjær

5.8. NORMES RELATIVES À L'ÉTALONNAGE D'ACCÉLÉROMÈTRES

Chez Brüel & Kjær, toutes les méthodes d'étalonnage et de test d'accéléromètres sont conformes aux normes ISO 5347 «*Méthodes pour l'étalonnage des capteurs de vibrations et de chocs*». Ces normes renferment des directives sur les techniques recommandées pour les diverses méthodes d'étalonnage et doivent être consultées pour plus de détails.

Voici d'autres normes relatives à l'étalonnage:

ANSI S2.11-1969 «*The selection of calibrations and tests for electrical transducers used for measuring shock and vibration*» (Choix de méthodes pour l'étalonnage et les essais des capteurs de vibrations et de chocs)

ISO/DP 8042 «*Mesurage des chocs et des vibrations - Caractéristiques à spécifier pour les capteurs sismiques*»

Document guide No. 3003 du British Calibration Service

6. APPENDICES

APPENDICE A

m	cm	mm	ft	in
1	100	1000	3,281	39,37
0,01	1	10	0,0328	0,3937
0,001	0,1	1	0,00328	0,03937
0,3048	30,48	304,8	1	12
0,0254	2,54	25,4	0,0833	1

T01087F0

Table 1. Conversion de longueur

m/s	km/h	ft/min	mile/h
1	3,6	196,85	2,2369
0,2778	1	54,68	0,6214
$5,08 \times 10^{-3}$	$1,829 \times 10^{-2}$	1	$1,136 \times 10^{-2}$
0,4470	1,6093	88	1

T01088F0

Table 2. Conversion de vitesse

g	m/s ²	cm/s ²	ft/s ²	in/s ²
1	9,81	981	32,2	386
0,102	1	100	3,281	39,37
0,00102	0,01	1	0,0328	0,3937
0,03109	0,3048	30,48	1	12
0,00259	0,0254	2,54	0,0833	1

T01089F0

Table 3. Conversion d'accélération

kg	tekma	gramme	lbs	oz
1	0,102	1000	2,2046	35,274
9,807	1	9807	21,6205	345,93
10^{-3}	$1,02 \cdot 10^{-4}$	1	$2,205 \cdot 10^{-3}$	$3,527 \cdot 10^{-2}$
0,45359	$4,625 \cdot 10^{-2}$	453,59	1	16
$2,835 \cdot 10^{-2}$	$2,8908 \cdot 10^{-3}$	28,35	$6,25 \cdot 10^{-2}$	1

T01091F0

Table 4. Conversion de masse

N	kp	lb ft/s ²
1	0,102	7,2329
9,807	1	71,0
0,1379	$1,405 \cdot 10^{-2}$	1

T01090F0

Table 5. Conversion de force

N/m ²	mbar	mm H ₂ O	atm	in WG	psi
1	10^{-2}	0,102	$9,869 \cdot 10^{-6}$	$4,02 \cdot 10^{-3}$	$1,4505 \cdot 10^{-4}$
100	1	10,917	$9,868 \cdot 10^{-4}$	0,402	$1,4504 \cdot 10^{-2}$
9,807	$9,807 \cdot 10^{-2}$	1	$9,678 \cdot 10^{-5}$	$3,937 \cdot 10^{-2}$	$1,4223 \cdot 10^{-3}$
$1,013 \cdot 10^5$	1013	$1,0332 \cdot 10^4$	1	406,77	14,696
249,10	2,491	25,4	$2,453 \cdot 10^{-3}$	1	$3,605 \cdot 10^{-2}$
6908,9	69,089	704,49	$6,805 \cdot 10^{-2}$	27,736	1

T01092F0

Table 6. Conversion de pression

J = Ws	kWh	kpm	kcal	Btu	ft lb
1	2,778 10^{-7}	0,1020	2,39 10^{-4}	9,48 10^{-4}	0,7376
3,6 10^8	1	3,6710 10^5	860	3413	2,655 10^6
9,807	2,7241 10^{-6}	1	2,3423 10^{-3}	9,2949 10^{-3}	7,233
4187	1,163 10^3	427	1	3,9685	3087,4
1056	2,93 10^4	107,59	0,25198	1	778
1,3558	3,766 10^{-7}	0,1383	3,239 10^{-4}	1,285 10^{-3}	1

T01094F0

Table 7. Conversion de travail, d'énergie et de chaleur

kW	kpm/s	hk	kcal/h	ft lb/s	hp
1	102	1,36	860	738	1,34
9,81 10^{-3}	1	1,33 10^{-2}	8,44	7,23	1,32 10^{-2}
0,735	75	1	632	542	0,986
1,16 10^{-3}	0,119	1,58 10^{-3}	1	0,858	1,56 10^{-3}
1,36	0,138	1,84 10^{-3}	1,17	1	1,82 10^{-3}
0,745	76	1,014	642	550	1
2,93 10^{-4}	2,99 10^{-2}	3,99 10^{-4}	0,252	0,216	3,93 10^{-4}
3,52	35,9	0,479	3024	259	0,471

T01098F0

Table 8. Conversion de puissance

Symbole	Préfixe	Multiple
G	giga	10^9
M	méga	10^6
k	kilo	10^3
c	centi	10^{-2}
m	milli	10^{-3}
μ	micro	10^{-6}
n	nano	10^{-9}
p	pico	10^{-12}

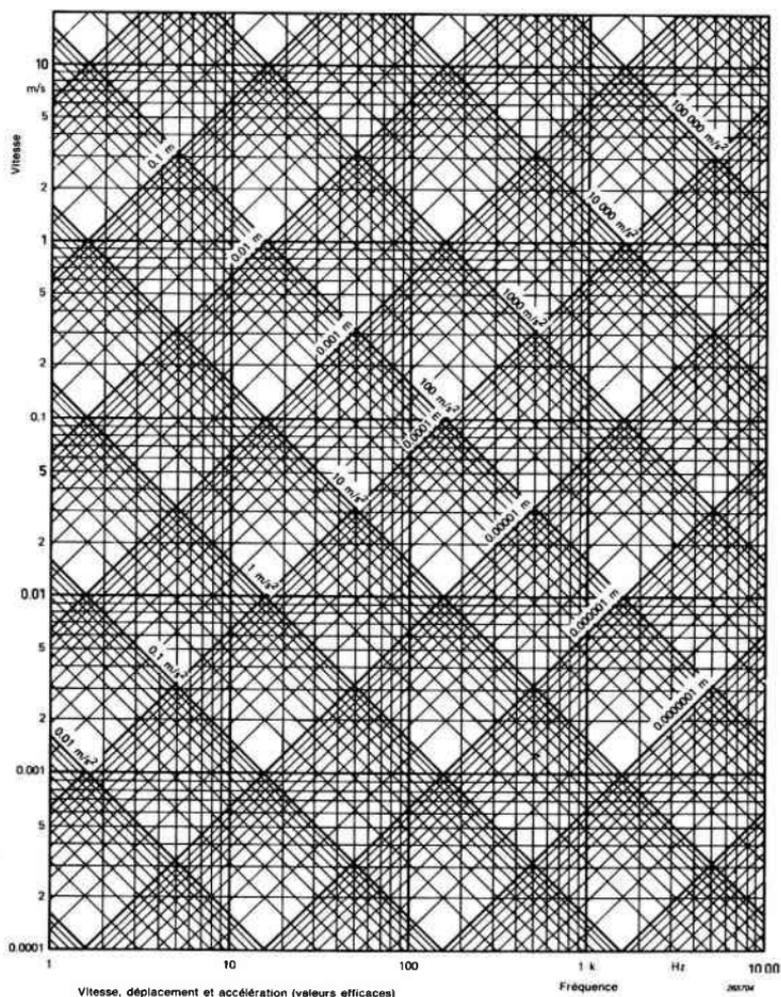
T01235F0

Table 9. Préfixes couramment utilisés

APPENDICE B

NOMOGRAMME DE VIBRATIONS

Le nomogramme de vibrations est une description graphique de la relation entre la fréquence, le déplacement, la vitesse et l'accélération pour des vibrations harmoniques simples. Si deux paramètres quelconques sont connus, les deux autres peuvent être lus à partir du nomogramme.



APPENDICE C

NORMES DE VIBRATIONS

À cause de la variété et de l'évolution continuelle des normes à travers le monde, l'inclusion d'un ensemble de normes importantes serait inutile. Cependant, Brüel & Kjær est l'auteur d'une publication, «*National and International Standards and Recommendations - Acoustics, Vibration & Shock, Luminance and Contrast*», disponible chez votre représentant local. Une sélection des normes principales spécifiques aux vibrations, publiée par tous les bureaux de normalisation, y est incluse avec les adresses de ces bureaux.

APPENDICE D

LITTÉRATURE BRÜEL & KJÆR SUR LES VIBRATIONS

Brüel & Kjær produit un grand nombre de publications techniques éducatives dans le domaine des vibrations. Elles sont réparties dans les catégories suivantes:

Opuscules. Il s'agit de textes de base de format A5 offrant une introduction simplifiée à la théorie et aux applications d'un sujet choisi. Il existe actuellement trois opuscules dans le domaine des vibrations: «*Mesures de vibrations*», «*Essais aux vibrations*» et «*Surveillance des machines*». Tous trois sont disponibles chez votre représentant Brüel & Kjær local.

Notes d'applications. Publiées régulièrement, elles se concentrent sur les applications possibles avec les équipements Brüel & Kjær dans des domaines particuliers.

Revue techniques. Publiées chaque trimestre, ces revues se rapportent aux applications possibles avec les instruments Brüel & Kjær et aux développements que la firme juge d'intérêt pour ses clients.

Livres. Plusieurs livres sur les vibrations sont disponibles chez Brüel & Kjær. En voici une sélection;

«Mechanical Vibration and Shock Measurements»

«Frequency Analysis»

«Modal Testing – Theory and Practice»

«Modal Analysis of Large Structures»

Une liste des Notes d'application et des Revues techniques actuelles est disponible sur commande.

APPENDICE E

Liste des préamplificateurs actuellement disponibles chez Brüel & Kjær. L'Amplificateur Line-Drive Type 2644 est couvert dans le chapitre 3. Pour de plus amples informations, consulter les Fiches techniques correspondantes.

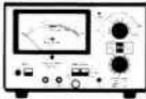
Préamplificateur Type	<p style="text-align: center;">2635</p>  <p style="text-align: center;">Amplificateur de charge à faible bruit. Réglage de sensibilité (3 chiffres)</p>	<p style="text-align: center;">2626</p>  <p style="text-align: center;">Amplificateur de charge à faible bruit. Réglage de sensibilité (3 chiffres)</p>
Modes de mesure	Accélération Vitesse Déplacement	Accélération
Sensibilité à l'accélération	0,1 mV à 10 V/pC (-20 à + 80 dB)	0,1 mV à 1 V/pC (-20 à + 60 dB)
Gamme fréquentielle (limites -3 dB)	0,1 Hz à 200 kHz	0,3 Hz à 100 kHz
Limites fréquentielles (-3 dB) au choix	Basse 0,2; 1; 2; 10 Hz (limites 10%)	0,3; 3; 10; 30 Hz
	Haute 0,1; 1; 3; 10; 30; > 100 kHz (limites 10%)	1; 3; 10; 30; > 100 kHz
Alimentation	Piles internes DC externe	Secteur AC
Autres options	Indicateurs de surcharge et d'état des piles. Oscillateur de référence	Indicateur de surcharge. Sorties directes et couplées/transformateur
Applications	Mesures de vibrations <i>in situ</i> . Mesures subaquatiques avec hydrophones	Mesures d'ordre général. Étalonnage d'accéléromètres par comparaison

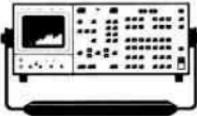
<p style="text-align: center;">2651</p>  <p style="text-align: center;">Amplificateur de charge. Réglage de sensibilité Uni-Gain® (3 chiffres). Possibilités de mesure en très basse fréquence</p>	<p style="text-align: center;">2634</p>  <p style="text-align: center;">Amplificateur de charge. Petit et robuste. Gain ajustable. Excellente immunité aux radiations électromagnétiques</p>	<p style="text-align: center;">2650</p>  <p style="text-align: center;">Amplificateur de charge et de tension à faible bruit. Réglage de sensibilité (4 chiffres)</p>
<p style="text-align: center;">Accélération Vitesse</p>	<p style="text-align: center;">Accélération</p>	<p style="text-align: center;">Accélération</p>
<p style="text-align: center;">0,1; 1; 10 mV/pC (-20 à +20 dB)</p>	<p style="text-align: center;">0,9 à 10 mV/pC ajustage interne (0 à 20 dB)</p>	<p style="text-align: center;">0,1 à 100 mV/pC (charge) ou 0,1 à 100 mV/V (tension) (-20 à +40 dB)</p>
<p style="text-align: center;">0,003 Hz à 200 kHz</p>	<p style="text-align: center;">1 Hz à 200 kHz</p>	<p style="text-align: center;">0,3 Hz à 200 kHz</p>
<p style="text-align: center;">0,003; 0,03; 0,3; 1 Hz</p>	<p style="text-align: center;">—</p>	<p style="text-align: center;">0,3; 3 Hz; 2 kHz</p>
<p style="text-align: center;">200 kHz</p>	<p style="text-align: center;">—</p>	<p style="text-align: center;">1; 3; 10; 30; > 200 kHz</p>
<p style="text-align: center;">DC externe</p>	<p style="text-align: center;">DC externe</p>	<p style="text-align: center;">Secteur AC</p>
<p style="text-align: center;">Entrée masse signal «flottante» ou rapportée à la masse</p>	<p style="text-align: center;">Peut être fixé au corps des machines. Entrée normale ou diff.</p>	<p style="text-align: center;">Indicateur de surcharge Oscillateur de référence</p>
<p style="text-align: center;">Mesures multi-voies. Mesures de chocs</p>	<p style="text-align: center;">Mesures de vibrations en environnement industriel. Installation permanente</p>	<p style="text-align: center;">Étalonnage d'accéléromètres par comparaison. Mesures d'ordre général</p>

T00969F0

APPENDICE F

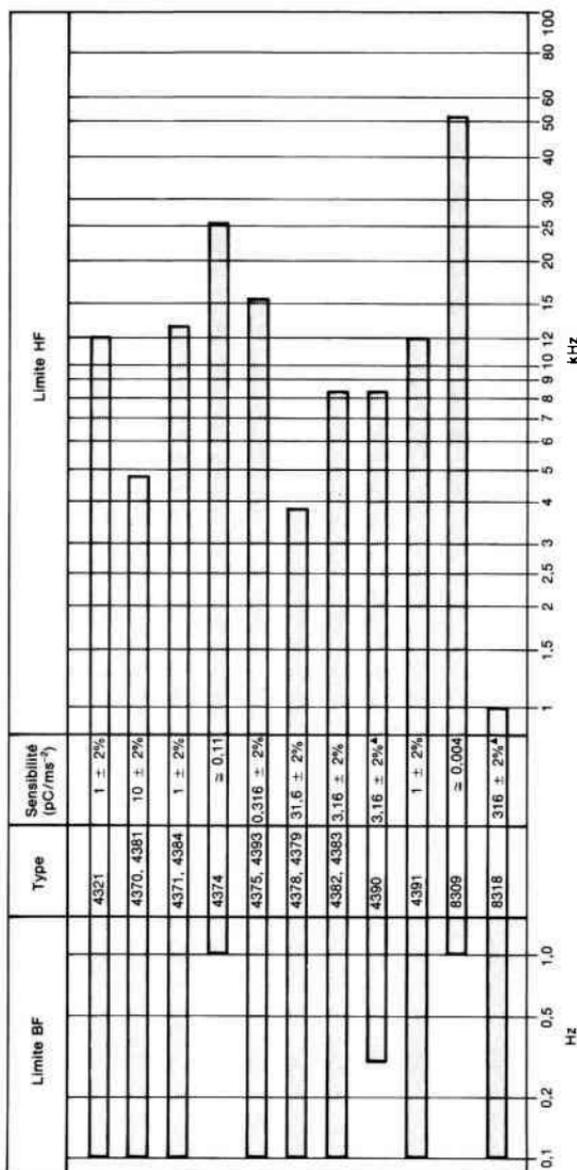
Les accéléromètres peuvent être directement connectés à ces instruments. Pour plus de détails, consulter les Fiches techniques correspondantes.

Instrument Type	<p style="text-align: center;">2511</p>  <p style="text-align: center;">Mesureur de vibration</p>	<p style="text-align: center;">2513 2516³</p>  <p style="text-align: center;">Mesureurs de vibration intégrateurs</p>
Description	Portatif et autonome pour les mesures générales et la surveillance de vibrations	Mesureurs de vibration économiques et précis pour utilisation répétée
Modes de mesure	accélération, vitesse, déplacement	accélération, vitesse
Gamme fréquentielle (-3dB)	0,3 Hz à 15 kHz	10 Hz à 10 kHz ¹
Limites fréquentielles (-3dB) au choix	Lim. BF: 1,3 et 10 Hz ¹ Lim. HF: 1 et 15 kHz ²	Lim. BF ² : 8 Hz et 10 Hz Lim. HF ² : 1 kHz et 10 kHz
Détecteurs	Valeurs efficaces, crête-à-crête	L _{eq} 60 s, retenue de crête
Source d'alimentation	Piles internes DC externe	Piles internes
Entrée	Charge	Charge
Remarques	<ol style="list-style-type: none"> 1. 0,3 Hz et 3 Hz pour le mode accélération 2. Réglé à 1 kHz, le 2511 peut être utilisé pour les mesures d'intensité vibratoire 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pondération linéaire 2. Mesures d'intensité de vibration (ISO/DP 5349 et ISO 2954), main-bras et en bande large 3. Le 2513 utilise les unités SI, et le 2516 les unités anglo-saxonnes. La combinaison 2513/WH 2134 est une version simplifiée de ces instruments

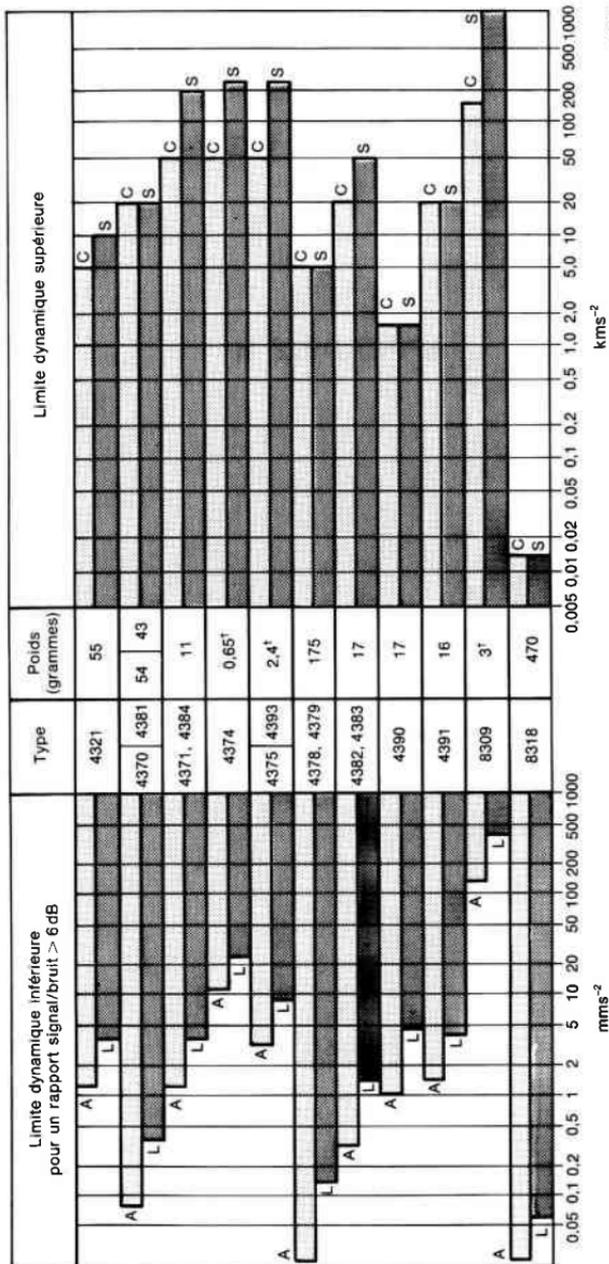
<p style="text-align: center;">7007 ZM 0060</p>  <p style="text-align: center;">Enregistreur magnétique</p>	<p style="text-align: center;">2515</p>  <p style="text-align: center;">Analyseur de vibration</p>
<p>Instrument portable pour utilisation sur le terrain et en laboratoire. Enregistrement des données vibratoires et sonores avec l'unité ZM 0060</p>	<p>Analyseur FFT à une voie conçu pour la détection et le diagnostic des défauts de machine.</p>
<p>accélération, vitesse</p>	<p>accélération, vitesse, déplacement (analogique)</p>
<p>0,3 Hz à 16 kHz¹</p>	<p>0,3 Hz à 20 kHz (-1 dB)¹</p>
<p>Lim. BF: 0,3, 1 et 10 Hz —</p>	<p>Lim. BF: 0,3 Hz or 3 Hz Lim. HF: 8 lim. au choix, dépendant du mode de mesure</p>
<p>—</p>	<p>Valeur eff. glob. - plusieurs modes d'analyse fréquentielle</p>
<p>Piles internes DC externe</p>	<p>Piles internes DC externe</p>
<p>Charge</p>	<p>Charge, tension, Line-Drive</p>
<p>1. Dépend de la vitesse de la bande</p>	<p>1. Les options suivantes sont disponibles: Pourcentage de bande constant (6% et 23%); analyse en bande étroite; analyse par zoom, balayage et cepstre; compensation de vitesse; comparaison de spectres; stockage de masse</p>

T00943F0

APPENDICE G



Limites HF et BF (10%) et sensibilités des accéléromètres d'usage général. ▲ Indique le type Line-Drive dont la sensibilité est exprimée en $\mu A/ms^{-2}$.



451/206

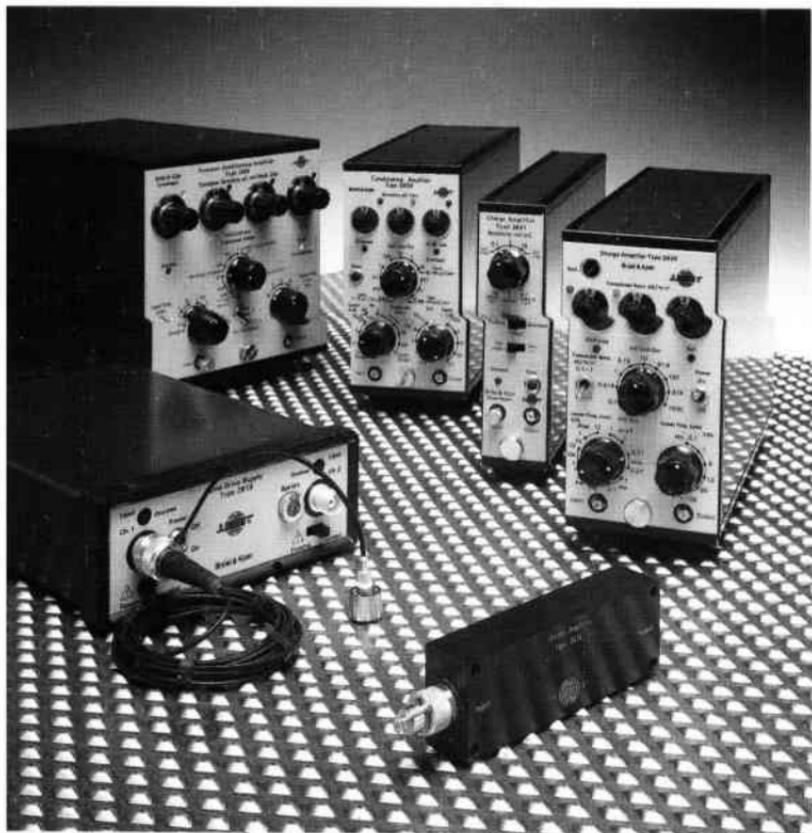
Hautes et basses limites dynamiques de mesure et masses des accéléromètres. Les hautes limites (C= vibration sinusoïdale continue et S= choc) sont des valeurs de crête. Les basses limites (A= largeur de bande 1/3 d'octave jusqu'à 10% de la limite HF et L= 2 Hz à 22 kHz lin.) sont des valeurs efficaces. Les limites dynamiques sont des niveaux vibratoires que l'on mesure en employant l'Amplificateur de charge Type 2635. † indique que le poids du câble est exclu.

APPENDICE H

Type	Poids (g)	Sensibilité		Gamme fréquentielle Limite + 10% (kHz)	Caractéristiques	Applications
		Tension mV/ms ⁻² (mV/g)	Charge pC/ms ⁻² (pC/g)			
4374	0,65 (câble exclu)	≈ 0,18 (≈ 1,8)	≈ 0,11 (≈ 1,1)	26	Miniature à cisaillement plan. Haute fréquence de résonance. Câble intégré. Sensibilité Uni-Gain®	Mesures de vibrations et de niveaux élevés, dans les espaces restreints et sur les structures délicates. Mesures de chocs
4393	2,4	≈ 0,48 (≈ 4,8)	0,316 ± 2% (3,10 ± 2%)	16,5	Miniature à Cisaillement en delta®. Haute fréquence de résonance	
4375	2,4 (câble exclu)	≈ 0,48 (≈ 4,8)	0,316 ± 2% (3,10 ± 2%)	16,5	Miniature à Cisaillement en delta®. Haute fréquence de résonance. Câble intégré	
4391	16	≈ 0,8 (≈ 8)	1 ± 2% (9,81 ± 2%)	12	Cisaillement en delta®, Uni-Gain® Base isolée électriquement. Connecteur TNC robuste	Mesures de chocs et de vibrations
4371	11	≈ 0,8 (≈ 8)	1 ± 2% (9,81 ± 2%)	12,6	Sortie sur le côté	
4384	11	≈ 0,8 (≈ 8)	1 ± 2% (9,81 ± 2%)	12,6	Sortie sur le dessus	
4382	17	≈ 2,6 (≈ 26)	3,16 ± 2% (31,0 ± 2%)	8,4	Sortie sur le dessus	
4383	17	≈ 2,6 (≈ 26)	3,16 ± 2% (31,0 ± 2%)	8,4	Sortie sur le côté	
4390	17	3,16 ± 2% µA/ms ⁻² (31,0 ± 2% µA/g)		8,4	Cisaillement en delta®, Uni-Gain®. Préamplificateur Line-Drive incorporé	
4370	54	≈ 8 (≈ 80)	10 ± 2% (98,1 ± 2%)	4,8	Sortie sur le dessus	
4381	43	≈ 8 (≈ 80)	10 ± 2% (98,1 ± 2%)	4,8	Sortie sur le côté	Mesures générales de vibrations. Meilleure sensibilité pour les mesures bas niveaux
4378	175	≈ 26 (≈ 260)	31,6 ± 2% (310 ± 2%)	3,9	Sortie sur le dessus	
4379	175	≈ 26 (≈ 260)	31,6 ± 2% (310 ± 2%)	3,9	Sortie sur le côté	Environnements présentant uniquement des bas niveaux de vibration
8318	470	316 ± 2% µA/ms ⁻² (3100 ± 2% µA/g)		1	Construction à Cisaillement en delta®. Très grande sensibilité Uni-Gain®. Préamplificateur Line-Drive incorporé	
8309	3 (câble exclu)	≈ 0,04 (≈ 0,4)	≈ 0,004 (≈ 0,04)	54	Goujon de montage (5 mm) et câble intégrés	Mesures de chocs jusqu'à 1 million ms ⁻² . Mesures de vibrations de très haute fréquence
4321	55	≈ 0,8 (≈ 8)	1 ± 2% (9,81 ± 2%)	12	Triaxial, Cisaillement en delta®, Uni-Gain®. Trois sorties indépendantes pour des mesures simultanées	Mesures dans trois directions mutuellement perpendiculaires
4322	350	≈ 0,8 (≈ 8)	1 ± 2% (9,81 ± 2%)	0,1 (boîtier en caoutchouc)	Triaxial. Construction à Cisaillement en delta®, sensibilité Uni-Gain®. Boîtier en métal et en caoutchouc	Le 4322 est employé avec le Mesureur de vibrations appliquées à l'homme Type 2512 (Pond. corps entier)
8305	40	-	≈ 0,125 (≈ 1,25)	5,3 (limite 2%)	Élément en quartz (grandes stabilité et gamme thermique). Étalonné par interférométrie laser (précision ± 0,6%)	Accéléromètre standard de référence pour étalonnage d'accéléromètres par comparaison.
8310	100 (câble exclu)	≈ 1,0 (≈ 10)	1 ± 2% (9,81 ± 2%)	9	Câble blindé intégré. Température de fonctionnement jusqu'à 400°C. Sensibilité Uni-Gain®	Accéléromètres industriels conçus pour utilisation dans les environnements les plus sévères, souvent rencontrés dans les situations de surveillance permanente. Le 8317 fonctionne jusqu'à 125 °C, le 8315 jusqu'à 250 °C et le 8310 jusqu'à 400 °C
8315	102	≈ 2,5 (≈ 25)	10 ± 2% (98,1 ± 2%)	8,1	Électriquement isolé pour faible bruit (champs électromagnétiques puissants)	
8317	112	3,16 ± 2% µA/ms ⁻² (31,0 ± 2% µA/g)		7,5	Préamplificateur Line-Drive incorporé pour faible bruit. Sûr en zone à danger d'explosion. Sensibilité Uni-Gain®	

T00720F0

Liste de la gamme d'accéléromètres actuellement disponibles chez Brüel & Kjær. Pour plus de détails, consulter les Fiches techniques les plus récentes relatives aux accéléromètres d'usage général, aux accéléromètres industriels et aux accéléromètres de référence



Brüel & Kjær 

DK-2850 Naerum · Danemark · Téléphone: +45 2 80 05 00 · Télex: 37316 bruka dk · Fax: +45 2 80 14 05

French DK BB0695-11