

Chapitre II : Le capteur de vibration

II.1. Introduction

II.2. La chaine de mesure de vibration

II.3. Le capteur

II.4. Les différents types de capteurs de vibration

II.5. Choix d'un capteur

II.6. Accéléromètres piézoélectriques

II.7. Conclusion

Chapitre II

Le capteur de vibration

II.1. L'introduction

Les nouvelles exigences imposées aux installations industrielles dans leur fonctionnement et dans la qualité de leur production, nécessitent une stratégie très élaborée pour maîtriser ces installations. La difficulté est d'avoir des informations adéquates et sûrs qui permettent de concevoir une action correctrice efficace. Le développement des capacités de traitement de l'information permet le contrôle et l'automatisation des systèmes de plus en plus complexes. Les possibilités de calcul des parties commandes ne semblent limitées que par la quantité et la qualité des données qui leur sont fournies. Au fur et à mesure les parties commandes augmentent en puissance, le calcul nécessite un flux d'informations de plus en plus grand. Le capteur et spécialement l'accéléromètre joue un rôle important dans le contrôle et la commande des systèmes industriels. Ce chapitre sera réservé aux capteurs, leurs fonctionnements, leurs importances dans la chaîne de mesure de vibration et leurs classifications.

Dans le milieu industriel, le mot capteur est souvent réservé à des appareils compacts. Pour des appareils plus encombrants on parlera de transmetteurs, ou pour des appareils spécialisés dans des mesures physico-chimiques, on parlera d'analyseurs industriels. Ils sont souvent classés en deux grandes familles [36]. En fonction de la nature de l'information émise :

- Les capteurs tout ou rien (TOR): ce sont des capteurs émettant un signal binaire 0 ou 1 (vrai ou faux) en fonction de la position de la valeur de la grandeur mesurée par rapport à une consigne. Ils sont utilisés dans les automatismes séquentiels.
- Les capteurs analogiques ou continus: ils émettent un signal analogique ou numérique. Une fonction généralement linéaire lie le signal émit à la grandeur mesurée.

II.2. La chaîne de mesure de vibration

La chaîne de mesure est composée d'éléments [36] montés comme illustré sur la Fig. II.1.

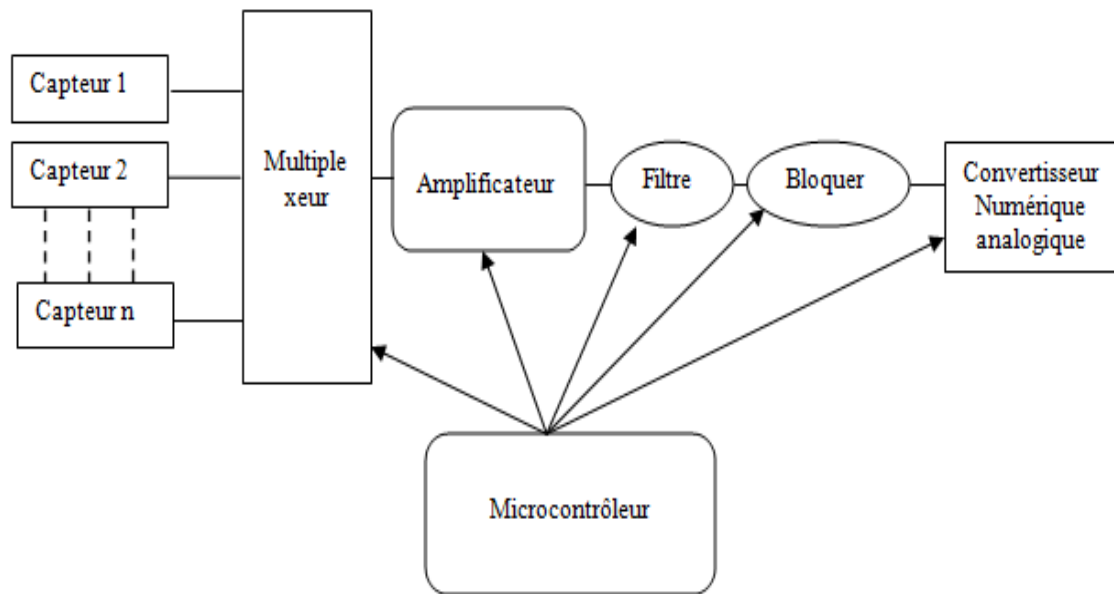


Fig. II.1. Les composants de la chaîne de mesure

- un ou plusieurs capteurs qui fournissent à l'entrée de la chaîne de mesure le signal électrique porteur de l'information du mesurande. Ce signal est donné directement par le capteur actif ou par l'intermédiaire du conditionneur du capteur passif.
- Un multiplexeur analogique chargé de choisir l'un des signaux électriques dans le cas d'un dispositif comprenant plusieurs capteurs.
- Un amplificateur de signal
- Un filtre analogique qui limite la bande passante aux fréquences significatives du signal.
- Un échantillonneur-bloqueur qui enregistre le niveau analogique pendant le temps nécessaire à son traitement.
- Un convertisseur analogique-numérique qui donne l'information numérique.
- Un microcontrôleur qui assure une, deux ou trois tâches indiquées ci-dessous :
 - *arrangement de la chaîne de mesure en sélectionnant les voies, les gains, et les filtres,
 - *opérations mathématiques de traitement du signal et d'analyse des données
- Affichage ou communication des résultats de la mesure sur une interface d'entrée-sortie informatique.

II.2.1. L'importance de la précision de mesure

La précision de mesure est importante pendant l'utilisation d'un capteur. L'amélioration de cette caractéristique parvient du traitement suivant [37]:

- Pour l'opération de filtrage ou l'opération d'extraction des paramètres du signal, il faut une implantation d'algorithmes de traitement du signal.

- La compensation des grandeurs d'influence en réalisant une structure à plusieurs capteurs sur laquelle se base la fusion des données.

II.2.2. Le signal émis

Le signal émis par le capteur est en général, un signal analogique en courant (4 - 20mA) ou en tension (1-5volts). On alimente le capteur par l'énergie électrique par l'intermédiaire d'une ligne de communication [38].

II.3. Le capteur

Le mesurande (m) est la grandeur physique mesurée et capturée par diverses opérations expérimentales, que l'on rassemble sous le terme de mesurage, qui dans plusieurs cas produit un signal électrique (s) image de la grandeur physique et de ses vibrations [36]. Le dispositif physique qui soumit à l'action du mesurande appelé un capteur, non électrique, produit la caractéristique électrique :

$$S = F(m) \quad (II.1)$$

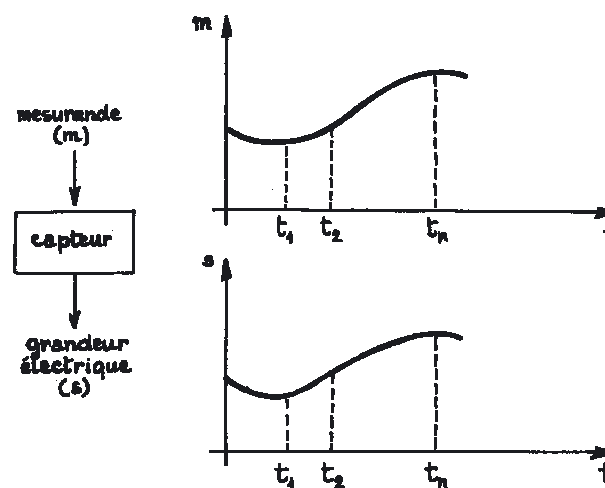


Fig. II.2. La fonction essentielle du capteur

Théoriquement, cette relation découle des lois physiques qui gèrent le fonctionnement du capteur. Numériquement, cette relation dépend de la conception du capteur, ses matériaux et de son environnement. Par conséquent, la formule numérique est fréquemment obtenue par une opération d'étalonnage, qui produit une courbe plus ou moins linéaire. Cette dernière est utilisée dans une zone linéaire dans laquelle la sensibilité S du capteur est constante et en fonction des variations de la grandeur de sortie ΔS et d'entrée Δm :

$$\Delta S = S * \Delta m \quad (II.2)$$

La technique de l'instrumentaliste consiste à utiliser la sensibilité S du capteur en réduisant les effets de la non-linéarité du mesurande m , de sa bande passante, du vieillissement, ainsi que l'influence des autres grandeurs physiques présentes dans l'environnement du capteur mais qui ne

sont pas l'objet de la mesure [36].

II.3.1. Les grandeurs d'influence

Les grandeurs d'influence sont des grandeurs qui peuvent générer des perturbations sur le capteur et cause des erreurs qui agissent sur le signal de sortie. La plupart des grandeurs d'influence sont liées à l'environnement des capteurs tels que [39]:

- la température (la plus importante) .
- la pression environnante,
- les vibrations mécaniques ou acoustiques, les chocs, le temps,
- la position du capteur et sa fixation,
- l'humidité, la projection d'eau, l'immersion,
- les ambiances corrosives,
- les perturbations électromagnétiques,
- les rayonnements nucléaires,
- les accélérations et la pesanteur,
- l'alimentation électrique du capteur

II.3.2. Le capteur de vibration

Le premier élément de la chaîne de mesure est le capteur de vibrations. Dans l'industrie le type le plus utilisable est l'accéléromètre ou capteur piézoélectrique. Généralement, le principe de fonctionnement des accéléromètres est de produire un signal électrique relatif au niveau de vibration [40].

Le choix de la façon d'utilisation de l'accéléromètre joue un rôle essentiel dans la prise de mesure. Les résultats des accéléromètres sont affectés par leur mode de fixation et leur emplacement. Il faut une liaison parfaite pour réaliser la fixation du capteur sur la structure vibrante. Il existe plusieurs modes de fixation tels que le goujon vissé, l'embase collée, l'embase magnétique et la pointe touche. Ces différents modes jouent un rôle important dans la mesure correcte des vibrations. La conception du capteur est en fonction du choix de l'emplacement de ce dernier. L'accéléromètre doit être placé à un endroit où la mobilité est maximale. Pour éviter les interférences extérieures, il faut placer le capteur près du défaut potentiel.

II.4. Les différents types des capteurs de vibration

Dans la dynamique, La loi fondamentale est la relation entre l'accélération (A) appliquée à un corps et la force (F), alors on écrit : $(F=M*A)$; où m est la masse. L'interaction entre la force et l'accélération est réciproque. La plupart des accéléromètres fonctionnent selon ce principe. L'évaluation de l'accélération est faite par la mesure de la force exercée sur un corps d'épreuve,

ou encore la déformation que cette dernière produit sur une structure. Divers techniques existes pour estimer le déplacement du corps d'épreuve. Les principaux types d'accéléromètres existants sont décrits et résumés ci-dessous [41].

II.4.1 L'accéléromètre à détection capacitive

Actuellement, les accéléromètres à détection capacitive sont les capteurs les plus utilisés. Leur principe de fonctionnement est illustré dans la Fig. II.3. La partie du capteur sensible à l'accélération est le corps d'épreuve (est une électrode mobile). Entre le corps d'épreuve et une partie fixe du système, la capacité est formée. Lors de l'accélération, l'éloignement et le rapprochement du corps d'épreuve à l'élément fixe varie la capacité, dans ce cas la détection consiste à évaluer l'accélération.

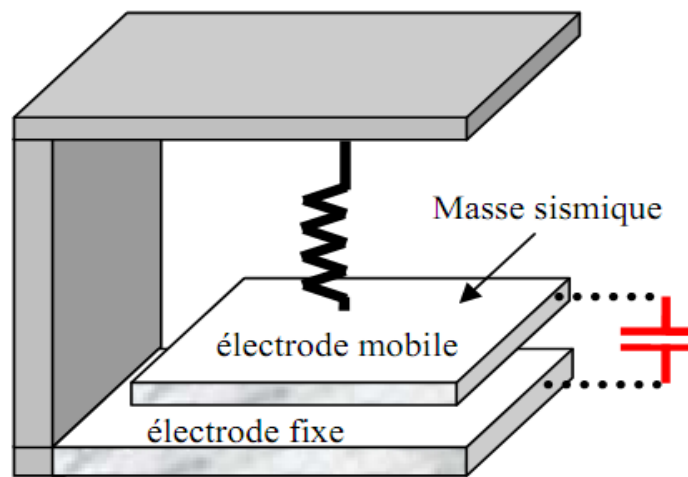


Fig. II.3. Le principe de l'accéléromètre capacitif [41]

Deux types de gravure sont utilisés pour les accéléromètres à détection capacitive. Deux étapes post-process sont nécessaires pour la gravure en volume (bulk micromachining) : l'une pour supprimer le diélectrique et l'autre pour libérer la partie mobile. Pour obtenir des structures suspendues, il faut utiliser la gravure en surface (surface micro-machining) qui consiste à éliminer des couches superficielles. Le gap entre les différents doigts étant très petit (de l'ordre du micron) cette technique permet de réaliser des capacités (de l'ordre du femto Farad). Les avantages des structures capacitatives sont: une faible sensibilité aux variations de température, une bonne réponse statique et une bonne performance en termes de bruit. À l'aide d'une force électrostatique, on utilise un retour de la force sur les structures qui permettra d'augmenter la robustesse du système face à des chocs élevés ou des vibrations de très grande amplitude, d'augmenter la linéarité et la stabilité, d'améliorer la réponse en fréquence, et enfin d'élargir la bande passante [41]. Ces structures sont sensibles aux interférences électromagnétiques à cause de leur nature capacitive. Le conditionnement de l'électronique devient ainsi plus complexe. Une électronique

performante est exigée pour obtenir une bonne résolution de petites variations de capacité lors du fonctionnement. La Fig. II.4 montre une structure d'accéléromètre à détection capacitive. Les capacités sont formées par des poutres disposées de façon à établir des peignes inter-digités. Le corps d'épreuve est un peigne mobile inter-digité avec un peigne fixe. Des capacités sont obtenues entre les doigts des peignes. Il y a des problèmes d'alignement des éléments capacitifs car les poutres formant les capacités se courbent à l'issue de la fabrication.

Pour les accéléromètres verticaux, les performances en termes de bruit sont de l'ordre du $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ et pour les accéléromètres latéraux sont de l'ordre de la centaine de $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$.

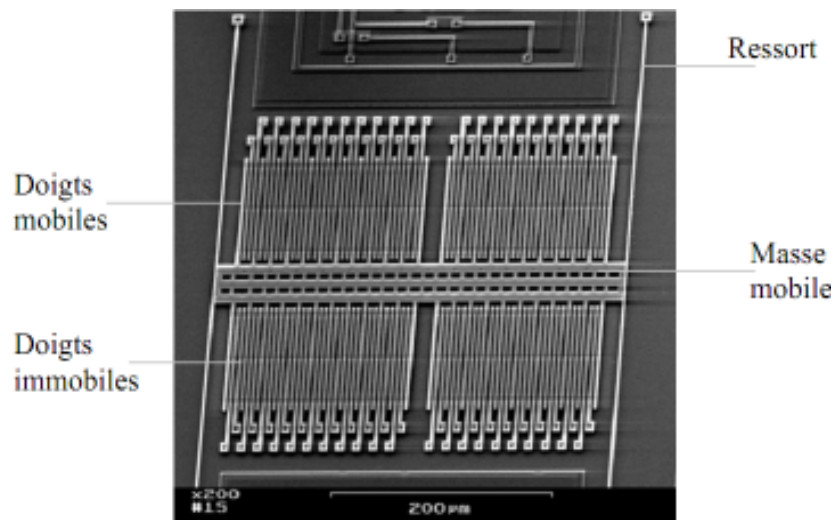


Fig. II.4. Accéléromètre à détection capacitive [41].

II.4.2 L'accéléromètre à détection piézorésistive

Dans les premiers accéléromètres, généralement la détection piézorésistive est utilisée jusqu'à présent dans certains capteurs commercialisés. Les microsystèmes à détection piézorésistive sont réalisés exclusivement par l'utilisation de procédé de gravure en volume (bulk micromachining). Tirant profit de la philosophie de la technologie de fabrication des capteurs de pression, les accéléromètres à détection piézorésistive micro-usinés en volume ont été développés et sont aujourd'hui en production [41].

Le corps d'épreuve est une poutre ou une masse suspendue, la variation de la résistance d'un élément piézorésistif permet de mesurer la déformation de la structure lors de l'accélération, la Fig. II.5 illustre ce principe. L'intégration de ces capteurs est facile en technologie.

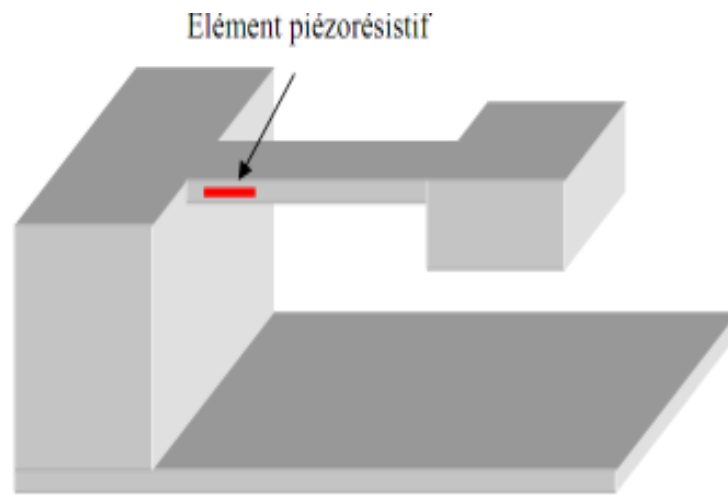


Fig. II.5 Principe de l'accéléromètre à détection piézorésistive [41]

II.4.3. L'accéléromètre à détection à base de piezojonction de transistor

Les conséquences des contraintes mécaniques sur le comportement des transistors ont été étudiées car des contraintes sur les circuits électroniques peuvent apparaître lors de l'encapsulation.

Dans ce type d'accéléromètre la piézo-sensibilité des transistors bipolaires est utilisée à la place des jauges piézo-résistives pour la mesure du signal. La contrainte exigée entraîne une repopulation des électrons dans le canal du transistor et échange ainsi le mouvement des électrons. Dans ce cas, on utilise un transistor comme un élément sensible qui réduit considérablement la taille de l'élément de transduction à la place de piézo-résistances. Cette approche a l'avantage de diminuer largement la puissance consommée par rapport à la détection piézo-résistive, ce qui représente un atout pour certaines applications [41].

II.4.4. L'accéléromètre à détection piézoélectrique

Un corps ayant la propriété de montrer un potentiel à ses bornes lorsqu'il est soumis à une force est appelé un corps piézoélectrique. Les matériaux utilisés sont souvent le ZnO ou le PZT (Piezoelectric lead Zirconate Titanate). Pour réaliser une contre réaction sur la structure, on utilise la propriété inverse de la piézoélectricité. Pour ce type d'accéléromètre, on peut utiliser un élément piézoélectrique unique (dans ce cas on échantillonne le temps et on le partage entre l'actionnement et la mesure) ou alors deux éléments piézoélectrique (ici les deux éléments forment un sandwich, l'un servant à l'actionnement et l'autre à la mesure). L'avantage de cette détection est la transduction à puissance consommée nulle (les variations de contraintes engendrant un potentiel).

Deux types de gravure sont utilisés dans les accéléromètres à détection piézoélectrique, le premier type est bulk-micromachining et le deuxième type est surface-micromachining. Cette méthode de

détection n'est pas acceptable avec une fabrication complètement CMOS (full-CMOS), il a besoin de dépôt de films piézoélectriques sur les structures. La Fig. II.6 illustre un accéléromètre à détection piézoélectrique [41].

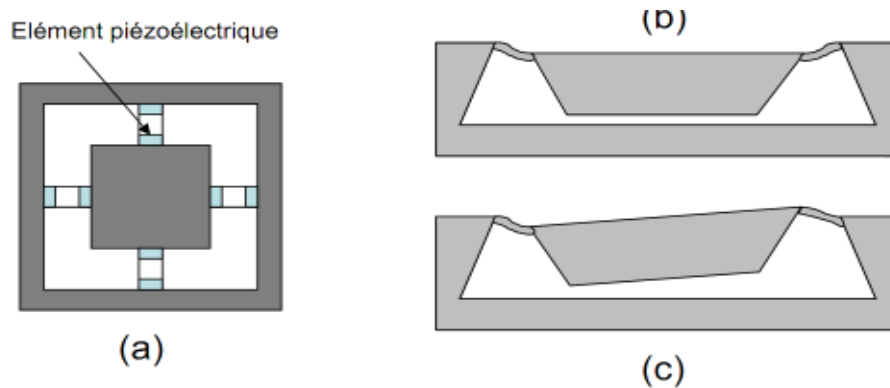


Fig. II.6. Un accéléromètre piézoélectrique à trois axes [41]

(a) vue de dessus de la structure, (b) accélération verticale, (c) accélération latérale

II.4.5 L'accéléromètre à détection à effet tunnel

Ce type d'accéléromètre est développé par les chercheurs du JPL (Jet Propulsion Laboratory, Pasadena), en se basant sur l'exploitation de l'effet des microscopes à effet tunnel. Pour produire l'effet tunnel, il faut une pénétration d'électrons entre deux électrodes métalliques, cela donne une plus faible barrière isolante entre ces deux électrodes [41].

Il nécessite entre une pointe attachée à la structure mobile et une électrode fixe un courant de (1 à 2 nA), l'espace de séparation étant de l'ordre de quelques angströms.

À l'aide d'une force électrostatique on asservit la position de la pointe. On mesure la tension nécessaire lors de l'accélération (pour produire la force électrostatique) au maintien à la même position de la pointe tunnel de façon à conserver le courant de tunnel constant. Un exemple d'accéléromètre à effet tunnel présenté dans la Fig. II.7. Ces dispositifs peuvent prendre de très grandes sensibilités (résolution de l'ordre du μg), on double le courant de tunnel à chaque Angström de déplacement, des changements de l'ordre du milli-Angström sont mesurables. Pour une bande passante de 1.5kHz, on obtient des résolutions de $0,5\mu\text{g}$.

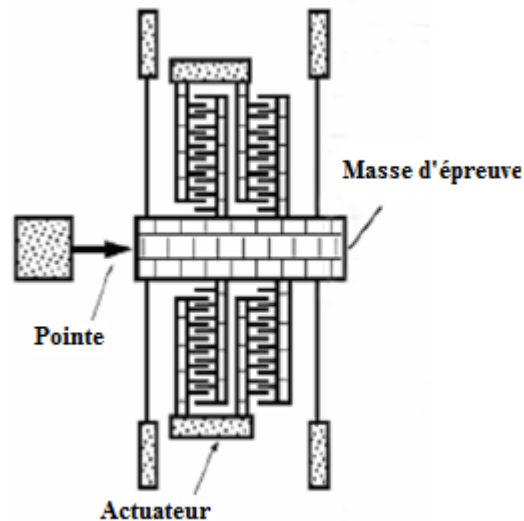


Fig. II.7. Un accéléromètre à effet tunnel [41]

II.4.6 L'accéléromètre à détection à structures résonantes

Le principe de cet accéléromètre consiste à évaluer le changement de la fréquence de résonance d'une structure en oscillation.

Ce type de détection a été utilisé dans les premiers accéléromètres en 1990, ces derniers sont micro-usinés dans du quartz. Couramment ces capteurs micro-usinés dans le silicium transfèrent la force inertielle de la masse d'épreuve à une force axiale sur la structure résonante, changeant ainsi sa fréquence de résonance [41].

L'avantage de la détection à structure résonante est présenté directement dans la mesure digitale. Un signal digital est mesuré par un compteur qui montre la fréquence de sortie et qui peut atteindre de très grandes sensibilités 700Hz/g. Ce type de capteur est composé d'un résonateur et d'une masse sismique mobile latéralement. La masse sismique contraint ou allonge la structure oscillante, variant ainsi sa fréquence de résonance lors de l'accélération (Fig. II.8).

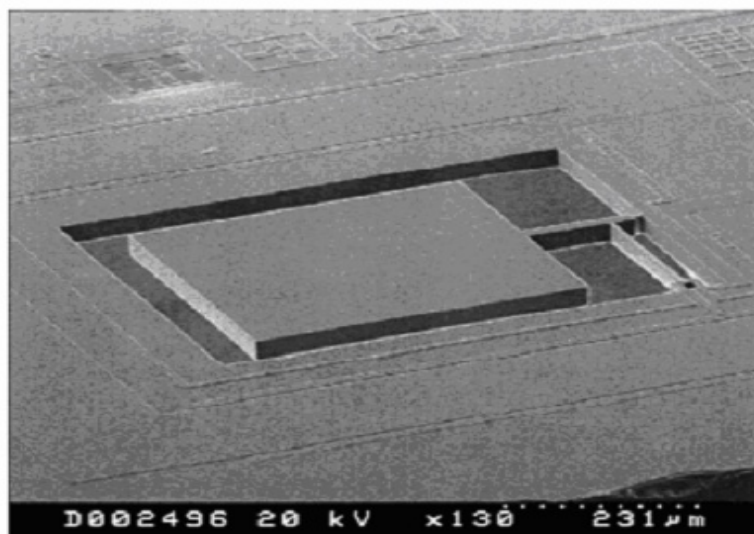


Fig. II.8. Un accéléromètre résonnant [41].

II.4.7 L'accéléromètre à détection optique

On profite des avantages des deux domaines par l'association de l'optique et du micro-usinage, cette association conduit à des capteurs miniatures insensibles au bruit d'interférence électromagnétique avec une réponse à l'accélération linéaire.

Il existe deux types de détections. La première consiste à mesurer l'intensité de la lumière modulée par l'accélération (Fig. II.9) [41]. La deuxième consiste à mesurer la longueur d'onde du signal réfléchi sur une masse sismique: une face de la masse sismique joue le rôle de miroir, la lumière réfléchie à une longueur d'onde qui concernera la distance miroir fibre optique (interféromètre de Fabry-Perrot).

Ces capteurs possèdent des inconvénients tels que la nécessité d'une source lumineuse, l'alignement parfait des fibres optiques et un coût trop élevé.

Aujourd'hui, exception pour quelques capteurs de pressions pour des applications hautes températures, aucun capteur MEMS à fibre optique n'est compétitif sur le marché. Ces capteurs sont spécialement destinés à des fonctionnements en environnement hostile (hautes températures, hautes interférences électromagnétiques ...).

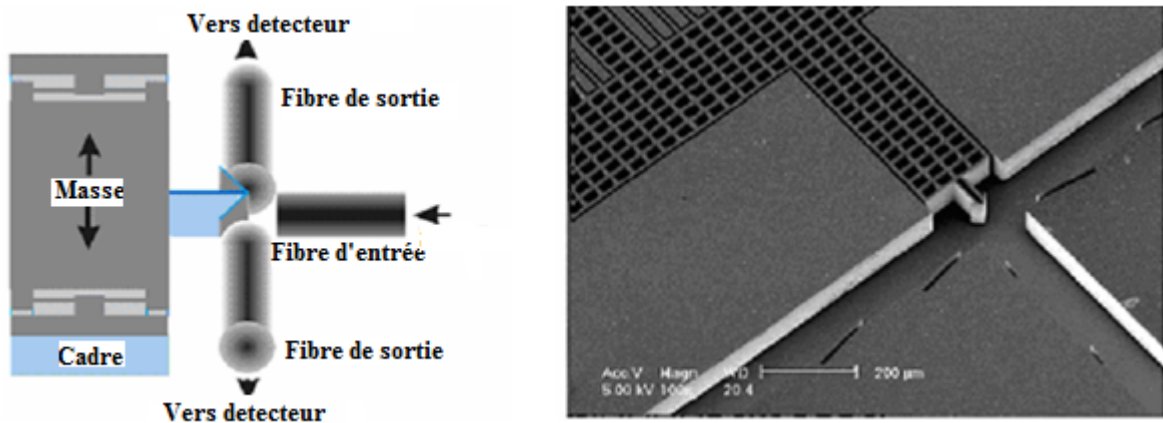


Fig. II.9. Un accéléromètre optique [41]

II.4.8 L'accéléromètre à détection thermique

On distingue deux types d'accéléromètres à détection thermique.

Le premier type possède une masse sismique suspendue au-dessus d'une source de chaleur (une simple résistance chauffante). La distance séparant la source de chaleur et le corps d'épreuve est changée par l'accélération qui joue le rôle de "puits de chaleur". Un flux de température de l'élément chauffant vers la masse sismique est entraîné par la différence de température. Si la distance à la masse est petite, ce flux devient plus important. Ce dernier dépend de l'accélération et la température proche de la résistance chauffante peut être mesurée à l'aide de thermocouples (polysilicium-aluminium) ou de thermistance [41].

Le deuxième type à détection thermique est un capteur sans masse d'épreuve. Ce type est basé sur le principe du transfert de chaleur par convection, d'une résistance chauffante vers des thermistances. La Fig. II.10 illustre ce type d'accéléromètre. La résistance chauffante produit une distribution symétrique de la température. Lorsqu'une accélération est appliquée, la distribution devient asymétrique et les capteurs latéraux permettent de mesurer la différence de température. La réalisation des accéléromètres thermiques est très simple, ces accéléromètres sont exclusivement de type FSBM (gravure en volume par face avant). La cavité dans le silicium permet de séparer thermiquement la résistance chauffante et aussi de provoquer une réduction de l'énergie consommée. Une attention particulière doit être portée à la conception de tels capteurs. Lorsque les détecteurs sont suffisamment proches de la résistance chauffante, il est possible de mesurer le gradient de température (remarquant qu'une rapidité de décroissance de la température quand on s'en éloigne); pourtant lorsque les détecteurs sont trop proches de l'élément central la sensibilité est réduite, en effet la sensibilité est relative à $\Delta T/T_0$, T_0 étant la température des détecteurs en manque d'accélération. La diminution de la sensibilité provoque une augmentation de la température ambiante (exigence de balancer l'effet de la température). Elle est relative à la puissance de chauffe et au carré de la pression de l'air dans la cavité, acceptant ainsi d'approcher des résolutions moindres au micro-g [41].

La fréquence de coupure de ces accéléromètres est de l'ordre de quelques centaines de hertz. Ensuite, l'inclinaison du diagramme de Bode étant du deuxième ordre, le signal n'est plus exploitable. Il doit agrandir la pression, diminuer les dimensions de la cavité et modifier la nature du gaz pour augmenter la bande passante (qui dépend de la constante thermique).

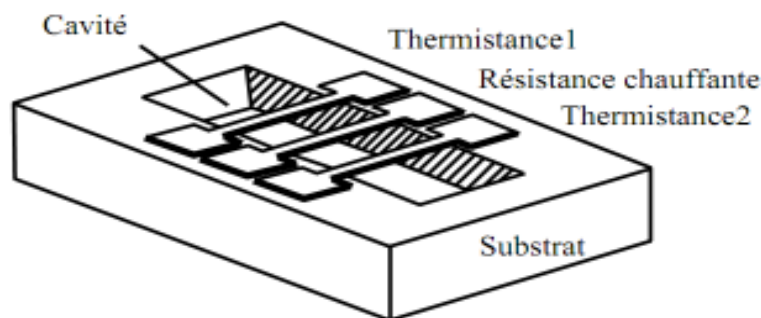


Fig. II.10. Un accéléromètre thermique [41]

II.4.9 L'accéléromètres à détections originales

Une fluide magnéto-rhéologique utilisé pour un accéléromètre à détection capacitive comme diélectrique a été étudié [41]. La propriété de solidifier de fluide magnéto-rhéologique, si on applique un champ magnétique et de redevenir liquide lorsque le champ magnétique est supprimé.

Dans l'accéléromètre à détection capacitive, la calibration de l'amortissement et l'augmentation

de la constante diélectrique faite par le fluide magnéto-rhéologique. Donc le signal de sortie est en fonction de l'accélération subie et de l'intensité du champ magnétique. Une sphère de silicium en lévitation comme masse d'épreuve est utilisé dans un autre accéléromètre innovant. La suspension électro-magnétique de la sphère besoin une tension nécessaire pour maintenir la sphère à la même position qui nous renseigne sur la valeur de l'accélération. La Fig. II.11 illustre une photo de l'accéléromètre à lévitation électromagnétique. Cet accéléromètre mesure l'accélération verticale et latérale avec une grande résolution. L'inconvénient de fabrication atypique de cet accéléromètre nécessite une tension d'alimentation élevée (15-30V).

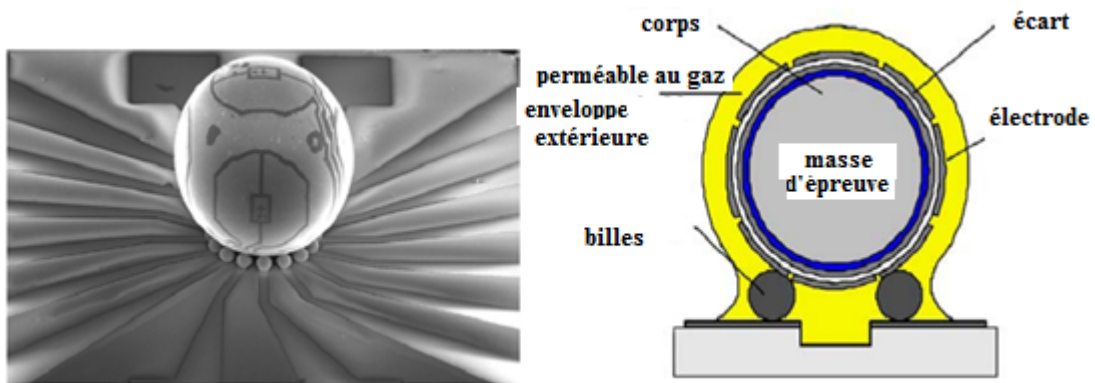


Fig. II.11. Un accéléromètre à lévitation électromagnétique [41]

Deux inductances sont utilisé dans cet accéléromètre, l'une sur la masse sismique et l'autre, séparée par de l'air, sur la partie immobile. Si on impose un courant à la première inductance, un champ magnétique est créé, il en résulte dans le second enroulement un courant proportionnel à l'amplitude du premier courant qui est proportionnel a son tour à la distance séparant les deux enroulements [41].

II.5. Le choix d'un capteur

Pour faire un choix du capteur, on est conduit à connaitre leurs caractéristiques. Il est évident que la nature de la grandeur à mesurer limite l'éventail des capteurs à utiliser. Un autre facteur important est le prix qui est souvent un élément déterminant. Les contraintes de fonctionnement imposées par le système sur lequel on fera la mesure et les caractéristiques métrologiques imposées par le cahier de charge sont aussi des critères essentiels pour le bon fonctionnement du capteur [37].

L'accéléromètre le plus utilisé dans l'industrie est l'accéléromètre à détection piézoélectrique pour les raisons suivantes :

- utilisable sur de très grandes gammes fréquentielles;
- large bande passante;

- bonne dynamique (rapport signal/bruit) ;
- taille réduite;
- solidité (aucune pièce en mouvement)

II.6. Les accéléromètres piézoélectriques

II.6.1. Le principe de fonctionnement

Dans ce modèle d'accéléromètre, la masse sismique est supportée par un élément piézoélectrique, qui donne un signal électrique relatif à la force de rappel, donc un déplacement de la masse sismique. L'ensemble est associé d'une embase rigide, le tout étant contenu dans un boîtier étanche.

L'accélération couramment mesuré dans les deux sens, le long de la direction de l'axe sensible, que la résistance mécanique du matériau piézo-électrique et des moyens de liaison nécessaires (collages ...) est différente en fonction de la nature de la contrainte appliquée (la compression, la traction, la cisaillement), il est nécessaire dans la plupart des cas pour assurer une précontrainte mécanique sur l'élément sensible afin d'étendre la zone de mesure dans les deux sens de l'accélération [36].

Ceci n'est pas toujours réalisable est accompli différemment suivant le mode de travail du matériau : mode longitudinal (accéléromètre dit en compression), mode de cisaillement, et mode de flexion.

A) Un accéléromètre piézoélectrique à compression

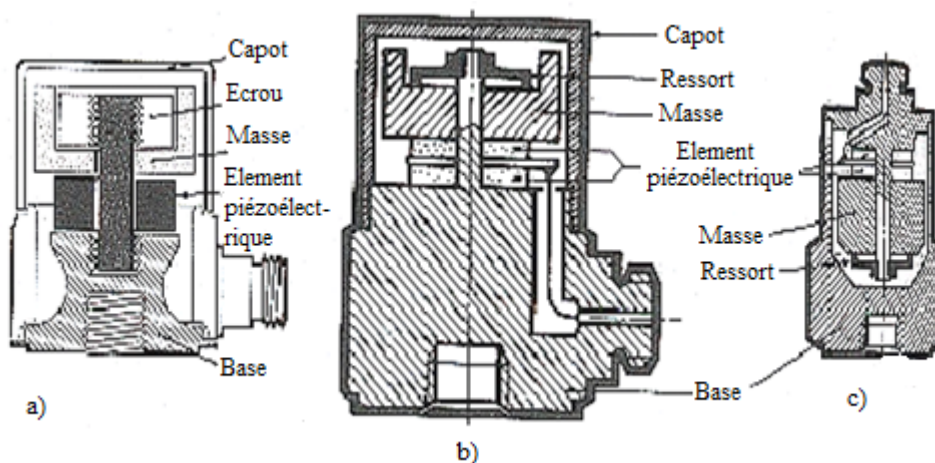


Fig. II.12. Coupes d'accéléromètres piézoélectriques à compression axiale [36].

Les caractéristiques propres à ces capteurs sont :

- Une fréquence de résonance assez grande car c'est le mode de fonctionnement correspondant par nature à la plus grande rigidité de l'élément piézoélectrique (module de compression)
- Une grande robustesse
- Une certaine sensibilité aux contraintes de base, qu'il est nécessaire de diminuer en rendant la base massive et découplée mécaniquement du cristal : forme adéquate de la base (Fig. II.12.a), montage inversé (Fig. II.12.c).
- Une sensibilité aux effets piézoélectriques qui nécessite d'apporter des moyens de compensation ou d'isolation lorsque les conditions de fonctionnement sont défavorables (mesures en très basse fréquence, température pouvant changer) [36].

B) Un accéléromètre piézoélectrique à cisaillement

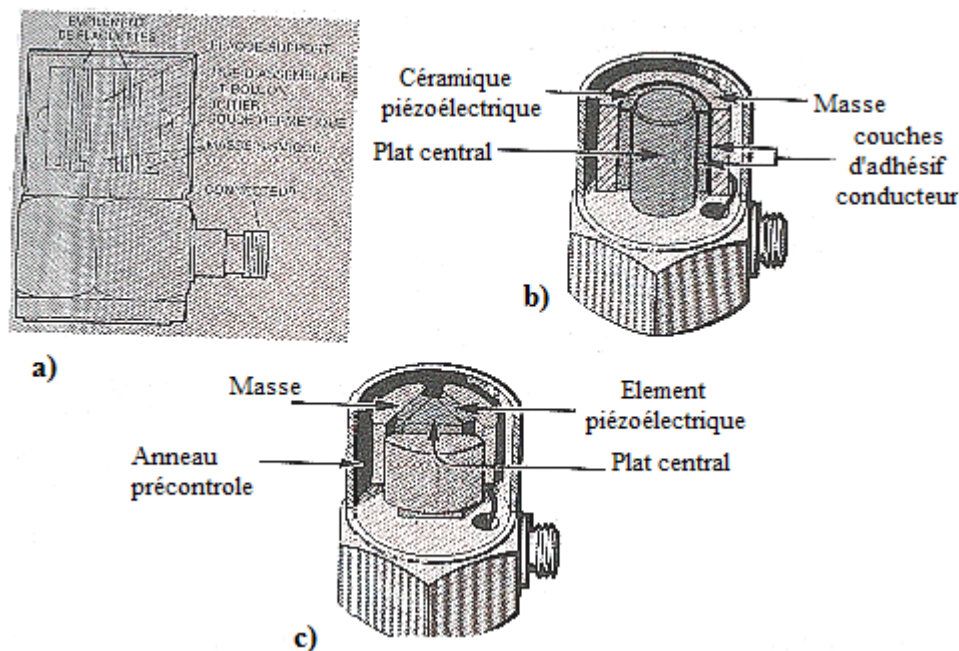


Fig. II.13. Constitution des accéléromètres piézoélectriques à cisaillement; montage : a- à empilement de plaquettes; b- à élément tubulaire; c- à cisaillement en delta [36].

Ces accéléromètres sont composés :

- Soit d'un empilement de plaquettes piézoélectriques boulonnées entre deux pièces métalliques servant de masse sismique (a).
- Soit d'un élément piézoélectrique en forme d'anneau (b) ou formé de plusieurs éléments plans (c), serti de force entre la ou les masses sismiques périphériques et la colonne centrale.
- Une certaine fragilité due au mode de travail du matériau piézoélectrique.

Le montage à empilement de plaquettes (a) et les montages à symétrie de révolution (b) et (c) se prêtent mieux à un assemblage mécanique précis, garant d'une faible sensibilité transversale, et à la miniaturisation, permettant d'obtenir une grande finesse.

C) Un accéléromètre piézoélectrique à montage en port-à-faux

Dans leur principe, ils utilisent la flexion d'un couple de minces plaquettes piézoélectriques collées Fig. II.14, dont l'extrémité porte une masse lotte. La sensibilité que leur confère cette forme peut être très grande, au détriment de la fréquence de résonance; leur champ d'applications est limité aux accélérations vibratoires de faible niveau et basse fréquence, où d'autres modèles, non piézoélectriques, ont des performances supérieures mais sous un encombrement généralement plus important [36].

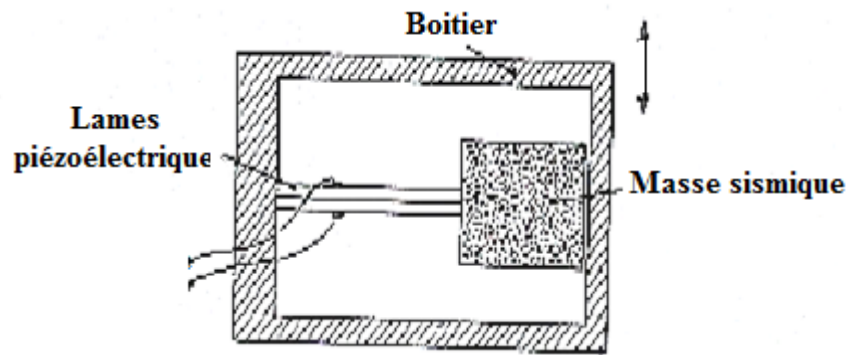


Fig. II.14. Principe d'un accéléromètre piézoélectrique à montage en porte-à-faux [36].

II.6.2. Les caractéristiques métrologiques

II.6.2.1. La sensibilité et la réponse en fréquence

La sensibilité du capteur (accéléromètre) est déterminée par la l'expression suivante [36]:

$$S = Q / \gamma = S_1 \cdot S_2 \quad (\text{II.3})$$

γ : l'accélération à laquelle est soumis le capteur,

z : le déplacement relatif de la masse sismique,

Q : la charge électrique résultante,

S : la sensibilité

S_1 : la sensibilité mécanique du système à masse sismique

S_2 : la sensibilité électrique du capteur piézoélectrique .

$$|S_1| = \left| \frac{z}{\gamma} \right| = \frac{1}{\omega_0^2 \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + (2\zeta \omega / \omega_0)^2}} \quad (\text{II.4})$$

$$|S_2| = \left| \frac{q}{z} \right| = d \cdot c \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_c}{\omega}\right)^2}} \quad (\text{II.5})$$

d : constante piézoélectrique

c : raideur de l'élément sensible

$\omega_c = 1/\tau$ = pulsation de coupure basse de l'ensemble capteur + conditionneur

La sensibilité relative S/S_m définie par rapport à la valeur aux fréquences moyennes $S_m = d \cdot c / \omega_0^2$

$$\left| \frac{s}{S_m} \right| = \frac{\frac{1}{\omega_0^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_c}{\omega}\right)^2} \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + (2\zeta \omega / \omega_0)^2}} \quad (\text{II.6})$$

Ordres de grandeur (type à compression et cisaillement):

$S_m \approx 10$ à 100 pc/g

$f_0 = \omega_0 / 2\pi \approx 10$ à 50 kHz

L'intensité de la résonance est due à la très faible valeur du taux d'amortissement ($\zeta \approx 0.01$ à 0.02)

Les limites pratiques de la bande passante, pour une erreur inférieure à $[-5\% \text{ } +5\%]$ sont:

Pulsation limite inférieure: $\omega_1 \approx 5\omega_c$

Pulsation limite supérieure : $\omega_2 \approx 0.2 \omega_0$

Lorsque des signaux indésirables essayent d'apparaître par excitation de l'accéléromètre près de sa résonance, ils sont supprimés par filtrage soit mécanique (suspension spéciale) soit électrique, au cours de l'amplification [36].

II.6.2.2. L'étendue de mesure (E.M), linéarité

L'étendue de mesure est limitée :

- vers le bas, par les bruits électriques dus au câble de liaison et à l'amplificateur, et les effets pyroélectriques éventuels ; avec des accéléromètres de sensibilité de l'ordre de 10 pc/g, cette limite est d'environ $0.001g$
- vers le haut, par la solidité structurelle du capteur, soit couramment et selon la sensibilité, 5000 à $10000g$, voir $10000g$ (accéléromètres pour chocs violents).

Dans le cas des accéléromètres à compression à précontrainte, celle-ci est un élément déterminant de l'étendue de mesure.

Dans un accéléromètre piézoélectrique, l'écart de linéarité dépend de:

- la non-linéarité propre du matériau piézoélectrique (le coefficient piézoélectrique varie avec la contrainte appliquée); pour le quartz est très faible et pour le céramique diminuée par la précontrainte.
- la non-linéarité d'ordre mécanique affectant le ressort de précontrainte axiale (ou son équivalent dans le cas d'une compression par écrou) et qui n'intervient donc pas dans le cas des accéléromètres à cisaillement.

La non-linéarité se manifeste par un agrandissement de la sensibilité, allant de 0.5% (cisaillement) à 5% (compression à vis) par 1000g dans les accéléromètres piézoélectriques à céramiques [36].

II.6.3. La réponse d'un accéléromètre

La réponse d'un accéléromètre piézoélectrique est montrée sur la courbe illustrée par la Fig. II.15.

Dans cette figure, il existe deux zones :

- une zone de linéarité du capteur : c'est la plage de fréquences à l'intérieur de laquelle la réponse du capteur correspond à l'amplitude du signal mesurée avec une bonne sensibilité. Cette zone identifie la plage de fréquences pour une bonne utilisation du capteur.
- Une zone contenant la résonance du capteur à l'intérieur de laquelle les mesures d'amplitude sont amplifiées, de façon non contrôlée. Cette zone sera évitée puisque la mesure est faussée [42].

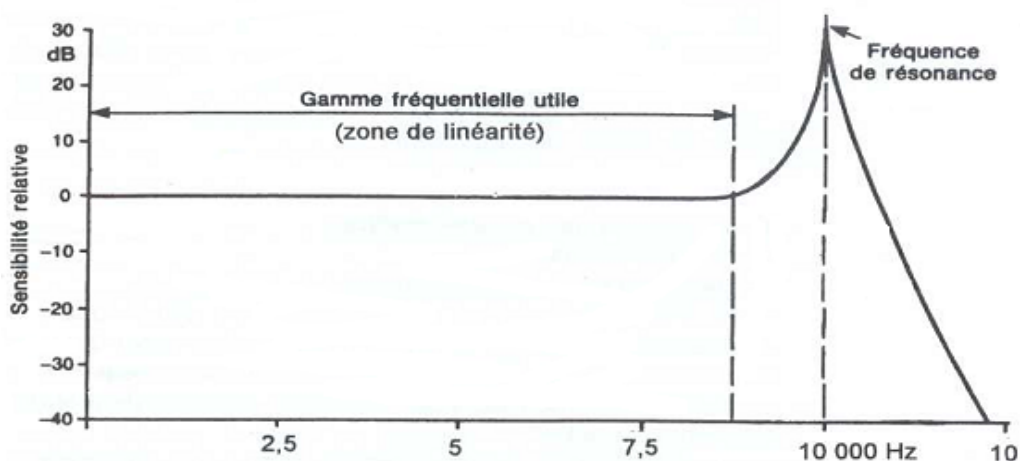


Fig. II.15. Courbe de réponse d'un accéléromètre [42].

II.6.3.1. La fixation des capteurs

- Le placement des capteurs doivent être lié directement avec les paliers, en bornant au strict minimum le nombre de pièces garantissant l'interface entre l'élément mouvant et le capteur (Fig. II.16).

- L'endroit des points de mesure doit être propre (pas de traces de graisse ou de peinture) et les surfaces de contact avec les capteurs lisses, planes et verticales a la direction de mesure.
- La prise de la mesure est opérée par un capteur au point judicieusement choisi en fonction des raideurs lorsque le palier est difficilement abordable de manière directe.
- Les mesures sont procédées toujours au même lieu sur la machine. Les points de mesure sont repérés, soit par la peinture, soit par place de goujons [42].

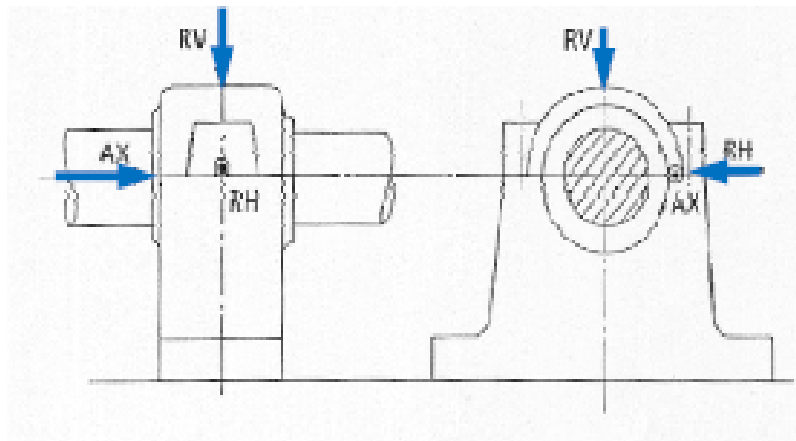


Fig. II.16. Choix directionnel pour la prise de mesure [42].

II.6.3.2. Les modes de fixation

L'effet de la fixation du capteur sur la structure peut agir sur la qualité du signal capté. Il existe diverses façons de fixer le capteur sur la machine : lié à même structure, fixé sur une embase collée, magnétique pour les structures ferriques, ou collé avec une pointe touche. Cette fixation joue un rôle important sur les mesures, et la largeur de la bande peut être affectée. Afin que la reproductibilité et la fiabilité des mesures soient bonnes même en basses fréquences, il est recommandé d'utiliser des embases collées (cyanoacrylate de méthyle). L'accéléromètre doit être installé en des lieux (pas toujours abordables) de la structure où la mobilité est maximale pour la bande de fréquences étudiée. La tendance actuelle est de fixer le capteur près du composant à suivre, en limitant les distances et les contacts, le signal sera moins perturbé. La réponse des accéléromètres est linéaire sur une large gamme de fréquences, qui peut être réduite en fonction de leur mode de fixation (Fig. II.17). Il faut effectuer les mesures dans une gamme de fréquences inférieures à la fréquence de résonance du capteur pour obtenir des résultats fiables et précis [42].

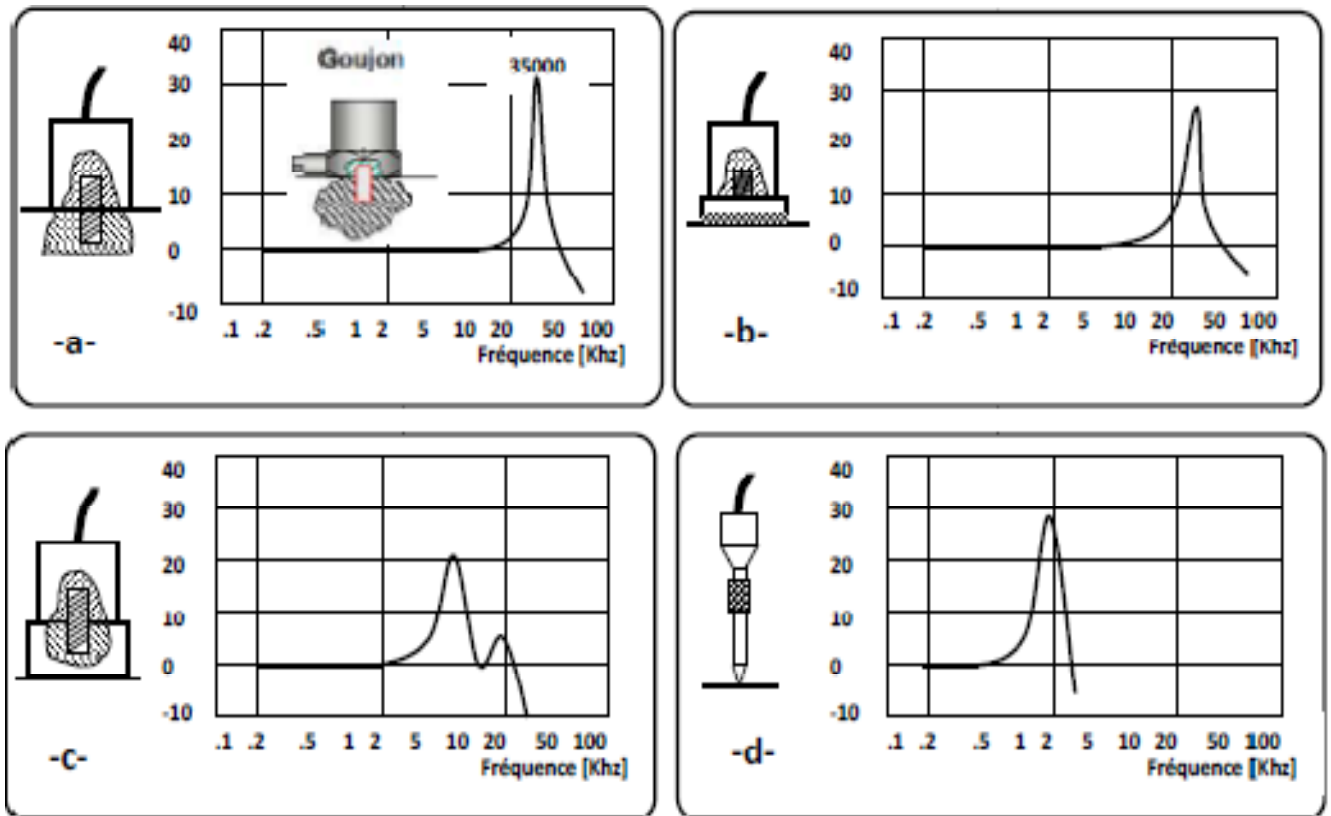


Fig. II.17. Réponse d'un accéléromètre en fonction de la fréquence selon le mode de fixation

-a- fixation par goujon -b- fixation par embase collée -c- fixation par aimant -d- fixation par pointe de touche [42]

II.6.4. Les grandeurs d'influence du capteur piézoélectrique

On retrouve ici les facteurs qui agissent sur les capteurs piézoélectriques (grandeurs d'influences), les différentes grandeurs d'influence sont [36] :

II.6.4.1. La température

La valeur et la variation de la température agit de deux façons différentes sur tout élément piézoélectrique.

L'importance de la valeur de la température sur la sensibilité électrique S_2 du capteur, cette valeur influée directement sur le coefficient piézoélectrique et probablement sur des facteurs mécaniques intervenant dans la fonction de transfert mécanique-électrique (par exemple la contrainte mécanique imposée par les dimensions des pièces et leurs dilatations relatives). Cette influence sur la sensibilité ne peut se juger qu'à température stabilisée.

Les variations de température de l'élément piézoélectrique entraînent la production de signaux électriques même dans le cas de l'absence de grandeur d'entrée vibratoire. Ces signaux sont dus à

des contraintes mécaniques subies par l'élément piézoélectrique du fait d'allongements différentes par exemple et à la propriété de conversion pyroélectrique accompagnant la majorité du temps la piézoélectricité.

Généralement, les matériaux les moins performants sous l'aspect de la sensibilité accélérométrique sont les matériaux les moins influencés par la température. Par exemple, le quartz comparé aux matériaux du type titanozirconate de plomb est environ 50 fois moins sensible mais a un coefficient de température qui est de 20 à 50 fois plus faible. Entre matériaux différents, on peut utiliser des techniques de compensation.

Les effets pyroélectriques à très basse fréquence (dérives) sont filtrés de manière naturelle par le passe-haut que constitue le conditionneur associé au capteur, auquel il importe donc de ne pas donner une bande passante vers les basses fréquences plus étendue que nécessaire. L'utilisation des accéléromètres dont l'embase est refroidie par mobilité forcée de fluide pour les mesures sur des structures portées à hautes températures (jusqu'à 2000 °C). Pour bien préciser les mesures, il est nécessaire de connaître les courbes de variation de sensibilité en fonction de la température [36].

II.6.4.2. Le vieillissement

La transformation irréversible de certaines caractéristiques du capteur sous l'influence des facteurs : temps, température, sollicitations mécaniques, est appelée le vieillissement. La sensibilité de l'accéléromètre est le paramètre le plus critique (perte partielle de polarisation du matériau). Le quartz est la matière la plus utilisée dans les capteurs destinés à l'étalonnage par méthode de comparaison à cause de ses performances élevées.

Les vieillissements sont dus à la marche permanente à une température trop proche de la limite d'emploi. Un étalonnage cyclique permet de pallier les dérives dans le temps, ou dues à une surcharge accidentelle [36].

II.6.4.3. Le bruit dus au câble de liaison

Une source de bruit au câble de liaison est due à l'influence de divers coefficients mécaniques ou thermiques. En effet les déformations des isolants ou les mouvements proportionnels entre isolants ou conducteurs engendrent des mouvements de charge par conséquences triboélectriques principalement, voir piézoélectriques ou pyroélectriques et aussi par changement géométrique des capacités distribuées.

Si le conditionneur de signal miniaturisé, est inclus dans le capteur, les problèmes de câble ne se posent plus. De mise en œuvre simple, ce type des accéléromètres, appelés à électrique insérée,

montrent évidemment une faible finesse, et leur tenue en température et aux chocs est limitée par la faiblesse de la partie électronique [36].

II.6.4.4. Le bruit dus à la pression acoustique ambiante

Dans un champ acoustique de puissante intensité, son effet probablement gêne lors de mesures de faibles accélérations. De préférence, s'il y a une action directe sur l'élément piézoélectrique, il faut craindre la conséquence sur lui de l'action de pressions acoustiques sur l'embase et le boîtier, qui ne sont pas d'une rigidité absolue. L'élément piézoélectrique et l'ensemble embase-boîtier du capteur sont bien découplés (accéléromètres à cisaillement) [36].

II.6.4.5. Le décalage de zéro

Pour les accéléromètres à céramiques, le décalage de zéro est un phénomène propre. Si un capteur est soumis à une accélération très violente (choc), un petit signal électrique (décalage de zéro) reste après la disparition du mesurande. On explique le phénomène par une certaine dépolarisation de la céramique à la suite d'une excitation de l'accéléromètre sur sa fréquence de résonance, où l'amplification est considérable, à cause par exemple d'un échelon abrupt, même si la valeur de celui-ci reste dans les limites de l'étendue de mesure [36].

Quand l'accéléromètre est soumis à des chocs répétés, le décalage de zéro est parfois minimisé, mais seulement de façon temporaire. Le décalage de zéro ne doit pas dépasser 1 à 2 % de l'amplitude crête.

II.7. La conclusion

Dans l'industrie, on rencontre des procédés ayant des dizaines de points de mesure. L'exploitant se base sur les informations données par les capteurs, pour suivre l'évolution de son procédé. Il remet souvent en cause la fiabilité et l'efficacité de ces capteurs.

La technicité et la conception des capteurs fait appel à de multiples domaines tel que la mécanique, l'électronique, l'informatique, la métrologie, ce qui rend complexe le travail du technicien. On choisit un capteur souvent en fonction des contraintes métrologiques et de fonctionnement. On doit l'installer convenablement pour avoir une information juste et précise, dans le but d'envisager son entretien pour assurer un fonctionnement sur une longue période. Pour assurer un bon choix du capteur, on est conduit à connaître ses caractéristiques. Il est évident que la nature de la grandeur à mesurer limite l'éventail des capteurs à utiliser. Un autre facteur important est le prix qui est souvent un élément déterminant. Les contraintes de fonctionnement imposées par le système sur lequel on fera la mesure et les caractéristiques métrologiques imposées par le cahier de charge sont aussi des critères essentiels pour le bon

fonctionnement du capteur. Dans l'industrie, l'accéléromètre le plus utilisé est l'accéléromètre piézoélectrique pour son utilisation sur de très grandes gammes fréquentielles, une bonne bande passante, une taille réduite, et une bonne robustesse. Le chapitre qui suit sera consacré au développement du modèle mathématique de l'accéléromètre, et sa validation par simulation et par test expérimental.