

## INTRODUCTION



Dans cet article, nous nous bornerons au domaine d'emploi courant des accéléromètres en mécanique rationnelle.

Après des rappels théoriques concernant les définitions et les unités (§ [1](#), [2](#) et [3](#)), nous aborderons les mesures [4](#) et les différents types d'accéléromètres.

Les accéléromètres sont utilisés pour des applications ou des mesures très diverses ; citons, à titre d'exemples :

- mesure des accélérations à bord de **véhicules automobiles** (suspensions actives et détecteurs de chocs) ;
- **navigation et guidage par inertie** concernant principalement les véhicules (avions, hélicoptères, bateaux, sous-marins, fusées et missiles), dans le domaine aérospatial, la mécanique des satellites et les sondes spatiales ;
- contrôle des accélérations dans les essais de chocs ou de vibrations d'équipements et structures ;
- **contrôles mécaniques** d'ensembles industriels ;
- essais de **simulation** au sol ;
- mesures **géophysiques**, géodésiques et aéronomiques.

Il existe une grande diversité de types d'accéléromètres et l'on peut envisager différents classements. Une première liste [4.2.1](#) comprend des capteurs de conception simple et non asservis. Cette classification est basée sur la nature du phénomène de détection. La liste n'est pas exhaustive, mais elle permet de passer en revue la plupart des phénomènes physiques qui sont utilisés dans la réalisation d'un accéléromètre.

Une seconde classification (§ [4.2.2](#) et [6](#)) concerne les accéléromètres généralement de haut de gamme à déplacements asservis.

On trouvera ensuite (§ [4.2.3](#) et [7](#)) les accéléromètres à poutres vibrantes et à ondes de surface. Bien que de type en boucle ouverte, certains de ces capteurs rivalisent en précision avec les appareils asservis.

Une classification supplémentaire concerne les accéléromètres répartis suivant l'emploi projeté [8](#).

Un dernier classement réunit les accéléromètres plus complexes et les capteurs microniques et intégrés [9](#).

---

### 1. Définitions



#### [1.1 Vecteur accélération](#)

#### [1.2 Accélération tangentielle, accélération normale](#)

### [1.3 Mouvement rectiligne](#)

### [1.4 Mouvement circulaire. Accélération angulaire](#)

### [1.5 Petits mouvements, vibrations](#)

### [1.6 Composition des accélérations. Accélération de Coriolis](#)

#### 1.1 Vecteur accélération

À tout point  $M$  en mouvement par rapport à un repère  $(R)$ , on associe le vecteur  $\vec{J}^{(R)}(M, t)$  appelé vecteur accélération de  $M$  dans  $(R)$  à l'instant  $t$ , défini par :

$$\vec{J}^{(R)}(M, t) = \frac{d^2(\vec{OM})}{dt^2}$$

$O$  étant un point fixe dans  $(R)$ .

$\vec{J}^{(R)}(M, t)$  sera noté, par simplification,  $\vec{J}$  dans la suite.

### [HAUT DE PAGE](#)

#### 1.2 Accélération tangentielle, accélération normale

Par dérivation par rapport au temps de l'expression du vecteur vitesse :

$$\vec{v} = \vec{\tau} \frac{ds}{dt}$$

avec :

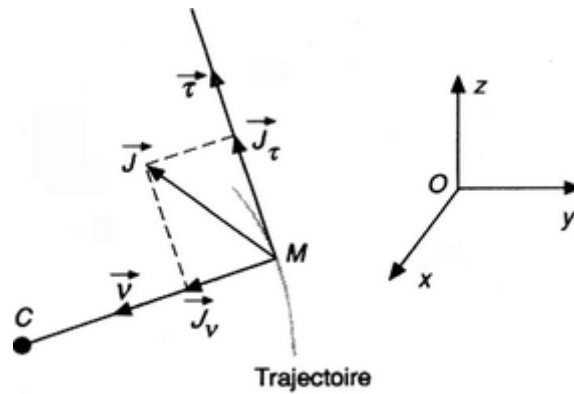
- $s$  : abscisse curviligne de  $M$
- $\vec{\tau}$  : vecteur unitaire tangent à la trajectoire en  $M$ , orienté dans le sens de mesure positive de  $s$ ,

on obtient :

$$\vec{J} = \frac{\vec{v}}{\mathcal{R}} \left( \frac{ds}{dt} \right)^2 + \vec{\tau} \frac{d^2s}{dt^2}$$

où :

- $\vec{v}/\mathcal{R}$  : représente la dérivée par rapport à l'abscisse curviligne  $s$  du vecteur unitaire tangent
- $\vec{v}$  : est le vecteur unitaire de la direction d'axe normal principal : il est perpendiculaire à  $\vec{\tau}$ , donc normal à la trajectoire de  $M$  ; il est orienté vers le centre de courbure de la trajectoire et fait l'angle  $+\pi/2$  avec le vecteur unitaire tangent
- $\mathcal{R}$  : (scalaire positif) est le rayon de courbure en  $M$  de la trajectoire.



C centre de courbure de la trajectoire en M  
**Figure 1** - Décomposition de l'accélération

L'égalité précédente peut s'écrire (figure 1) :

$$\vec{J} = \vec{J}_v + \vec{J}_\tau$$

$$\vec{J}_v = \frac{\vec{v}}{\mathcal{R}} \left( \frac{ds}{dt} \right)^2 = \frac{\vec{v}}{\mathcal{R}} v^2$$

est le vecteur d'**accélération normale** ;

$$\vec{J}_\tau = \vec{\tau} \frac{d^2s}{dt^2} = \vec{\tau} \frac{dv}{dt}$$

est le vecteur d'**accélération tangentielle**.

## [HAUT DE PAGE](#)

### 1.3 Mouvement rectiligne

Dans le cas du mouvement rectiligne, le déplacement, la vitesse et l'accélération du point  $M$  ont le même support  $Ox$  qui est la trajectoire de ce point ; la quantité  $1/\mathcal{R}$  est nulle et l'on a :

$$\vec{J}_v = \mathbf{0}$$

$$\vec{J}_\tau = \vec{\tau} \frac{d^2x}{dt^2}$$

Un mouvement rectiligne à accélération constante  $\gamma$  est un mouvement rectiligne uniformément accéléré. Il peut être représenté par l'équation :

$$x = \frac{1}{2} \gamma t^2 + v_0 t + x_0$$

Si, de plus, le mouvement est rectiligne uniforme, alors la vitesse est constante :

$$v = v_0 = Cte$$

$$\gamma = 0$$

$$x = v_0 t + x_0$$

[HAUT DE PAGE](#)

#### 1.4 Mouvement circulaire. Accélération angulaire

Nous pouvons décomposer l'accélération  $\vec{J}$  du point  $M$  se déplaçant sur le cercle  $C$  de centre  $O$ , suivant l'accélération  $\vec{J}_v$  normale, portée par le rayon  $OM$ , et l'accélération  $\vec{J}_\tau$  tangentielle, portée par la tangente  $MT$  (figure 2).

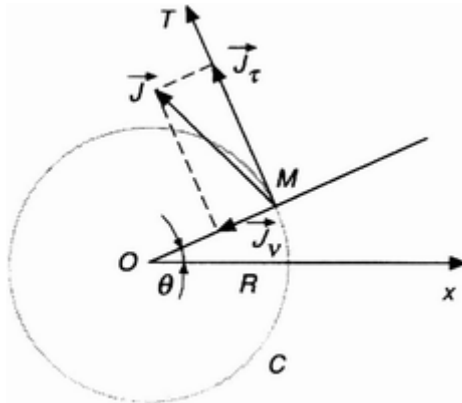


Figure 2 - Mouvement circulaire

— Accélération tangentielle :

$$|J_\tau| = \frac{dv}{dt} = R \frac{d^2\theta}{dt^2} = R \frac{d\omega}{dt}$$

avec :

- $\omega$  : vitesse angulaire.

Cette accélération, portée par la tangente  $MT$ , peut être dirigée dans un sens ou dans l'autre suivant le signe de  $d\omega/dt$ .

Cette dérivée  $\frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2}$  de la vitesse angulaire du rayon  $OM$  est dite accélération angulaire.

— Accélération normale :

$$|J_v| = R \left( \frac{d\theta}{dt} \right)^2 = R\omega^2 = \frac{v^2}{R}$$

Cette accélération est dirigée vers  $O$  sur la normale  $MO$ .

- Dans un mouvement circulaire uniforme,  $\omega = Cte$  et  $d\omega/dt = 0$ , donc :

$$|J_r| = 0 \quad \text{et} \quad |J_v| = R\omega^2 = \frac{v^2}{R}$$

## HAUT DE PAGE

### 1.5 Petits mouvements, vibrations

Dans ce cas, on peut admettre que la trajectoire est pratiquement linéaire ; si le mouvement est périodique, la vitesse change de signe au moins deux fois par période ainsi que, généralement, l'accélération.

**Exemple :**

**le mouvement sinusoïdal :**

$$x = a \sin \omega t, \quad v = a \omega \cos \omega t, \quad \gamma = -a \omega^2 \sin \omega t = -\omega^2 x$$

est la projection sur un axe d'un mouvement circulaire uniforme où  $R = a$  et  $\theta = \omega t$  ; abscisse, vitesse et accélération changent de signe à chaque demi-période. La mesure de telles accélérations fait appel aux accéléromètres à réponse rapide.

## HAUT DE PAGE

### 1.6 Composition des accélérations. Accélération de Coriolis

Soit un corps solide ( $S$ ) en mouvement par rapport au corps solide ( $R$ ) considéré comme fixe de référence. Le point  $M$  est mobile par rapport au solide ( $S$ ). Ce mouvement est dit **mouvement relatif**. La vitesse relative correspondante est désignée par  $\vec{v}^{(S)}(M)$ . À un instant  $t$ , le point  $M$  coïncide avec le point  $M^t$  lié au solide ( $S$ ) et fixe dans ( $S$ ). Le point  $M^t$  présente une accélération par rapport au solide ( $R$ ) fixe de référence. Cette accélération est désignée par :

$$\vec{J}^{(R)}(M_S^t) \text{ dite } \mathbf{accélération d'entraînement}$$

enfin le solide ( $S$ ) présente une rotation instantanée à l'instant  $t$  par rapport au solide ( $R$ ) fixe de référence, rotation qui s'exprime par le vecteur  $\vec{\omega}_S^R$ .

Dans ces conditions, le point  $M$  présente par rapport au solide ( $R$ ) de référence une accélération absolue qui se note :

$$\vec{J}^{(R)}(M)$$

Sa valeur est la somme des trois termes suivants :

- **l'accélération d'entraînement** du point  $M^t$  fixe dans ( $S$ ) et confondu avec  $M$  à l'instant  $t$ , désignée comme dit précédemment :

$$\vec{J}^{(R)}(M_S^t)$$

- **l'accélération relative** qui est celle subie par  $M$  dans son mouvement relatif par rapport au corps ( $S$ ) ; elle s'écrit :

$$\vec{J}^{(S)}(M)$$

- **l'accélération dite complémentaire ou de Coriolis** qui correspond au double du produit vectoriel du vecteur rotation instantanée défini plus haut,  $\vec{\omega}_S^R$ , avec le vecteur vitesse relative à  $M$  dans ( $S$ ), désigné comme déjà dit par  $\vec{v}^{(S)}(M)$  ; ce produit est donc :

$$2 \vec{\omega}_S^R \wedge \vec{v}^{(S)}(M)$$

La composition des accélérations s'écrit :

$$\vec{J}^{(R)}(M) = \vec{J}^{(R)}(M_S^t) + \vec{J}^{(S)}(M) + 2 \vec{\omega}_S^R \wedge \vec{v}^{(S)}(M)$$

On remarquera que, dans cette écriture,  $J$  désigne une accélération,  $\omega$  une vitesse de rotation et  $v$  une vitesse. L'indice supérieur entre parenthèses désigne le système de référence.

- **Application au mouvement d'un point à la surface de la Terre.**

Le *corps solide de repère* ( $R$ ) est un système ( $g$ ) dit *galiléen* bâti sur des astres considérés, avec une certaine raison, comme parfaitement immobiles vis-à-vis de la durée des expériences physiques courantes entreprises. Le *solide* ( $S$ ) *en mouvement* par rapport au solide galiléen est un système ( $T$ ) lié à la Terre (figure 3a).

On distingue en  $Oxyz$  le système de coordonnées trirectangles solidaire du solide d'immobilité *absolue* ( $g$ ) de référence. La Terre est figurée par un cercle méridien  $SRN$  où  $S$  et  $N$  sont les pôles sud et nord. L'axe  $SN$  est donc l'axe de rotation terrestre. Le méridien  $PCN$  est le méridien origine dont la trace équatoriale  $CP$  est perpendiculaire à  $SN$  et fixe dans le système galiléen, ainsi que l'est l'axe  $SN$ .

On peut donc choisir le système  $Oxyz$  tel que  $Oz$  soit parallèle à  $SN$ ,  $Ox$  parallèle à  $CP$ , et  $Oy$  parallèle à  $CR$ , lui-même rayon équatorial perpendiculaire au méridien origine  $PCN$ .

Dans le système de référence ( $g$ ), les axes  $Ox Oy Oz$  sont orientés du point  $O$  vers des astres fixes situés à l'infini, la position du point  $O$  est donc indifférente ; en particulier, on peut le placer au point  $C$ , centre de la sphère terrestre, auquel cas le système de coordonnées trirectangles galiléen ( $g$ ) est  $CPRN$ .

**Nota :**

l'orientation d'un axe du système ( $g$ ) n'est pas obligatoirement dirigée vers un astre, mais peut se déduire de directions d'astres voisins par la connaissance exacte des angles de ceux-ci avec l'axe de référence.

Dans ces conditions, le système ( $T$ ) lié à la Terre sera défini par les axes terrestres de coordonnées  $CQVN$  où :

- $CQ$  est la position à l'instant  $t$  du méridien contenant le point mobile  $M$  ;
- $CV$  est la trace équatoriale du méridien  $VCN$  perpendiculaire au méridien  $QCN$  d'angle horaire  $\alpha$  ;
- $CN$  l'axe de rotation terrestre.

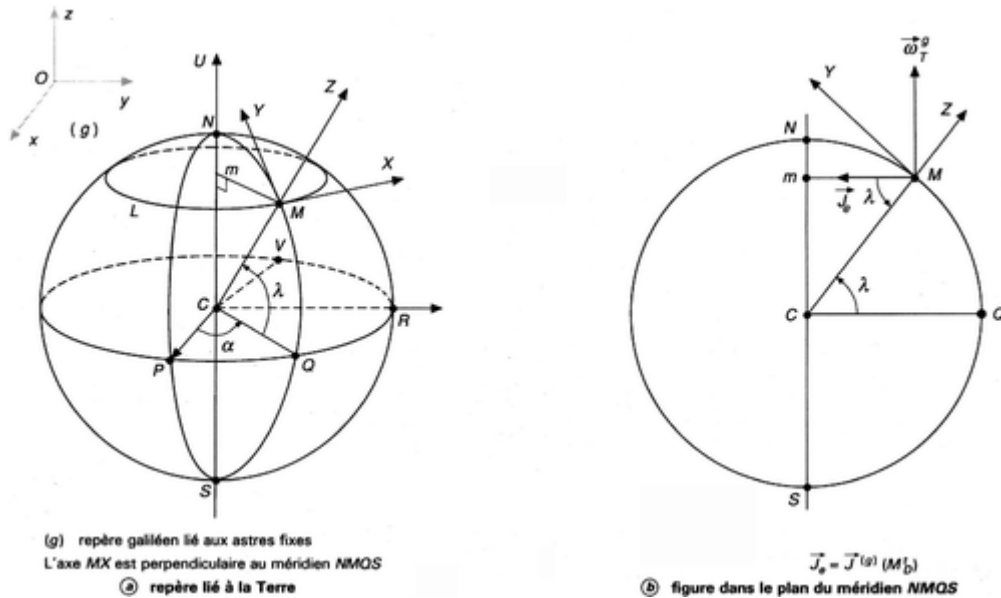


Figure 3 - Mouvement d'un point à la surface de la Terre

Le point mobile  $M$  est également situé sur le parallèle  $L$  de latitude  $\lambda$ . Le système de coordonnées  $MXYZ$  lié au point  $M$  correspond aux coordonnées locales, à l'instant  $t$ , où  $MX$  est l'horizontale dirigée à l'est,  $MY$  l'horizontale nord et  $MZ$  la verticale du lieu.

La rotation de la Terre autour de l'axe des pôles  $SN$  est un vecteur  $\vec{\omega}_T^g$  :

$$|\vec{C\dot{U}}| = |\vec{\omega}_T^g| = \frac{d\alpha}{dt}$$

À la latitude  $\lambda$ , le vecteur  $\vec{\omega}_T^g$  a pour composantes, dans le repère géographique ( $D$ ) lié à la Terre en  $M$  :

- suivant  $MX$  : 0 ;
  - suivant  $MY$  :  $\omega_T^g \cos \lambda$  ;
  - suivant  $MZ$  :  $\omega_T^g \sin \lambda$ .
- En connaissant la vitesse de  $M$  exprimée dans le repère géographique ( $D$ ), le calcul de l'accélération de Coriolis n'offre aucune difficulté, sa valeur étant :

$$2 \vec{\omega}^g \wedge \vec{v}^{(T)}(M)$$

- L'accélération d'entraînement (notée  $\vec{J}_e$  sur la figure 3) a pour valeur :

$$\vec{J}^{(R)}(M_D^t) = \vec{J}^{(g)}(M_D^t)$$

qui donne ici (figure 3b) :

$$\begin{aligned} |\vec{J}^{(g)}(M_D^t)| &= Mm \left( \frac{d\alpha}{dt} \right)^2 = CM \cos \lambda \left( \frac{d\alpha}{dt} \right)^2 \\ &= R \cos \lambda \left( \frac{d\alpha}{dt} \right)^2 \end{aligned}$$

avec :

- $R$  : rayon terrestre.

Cette accélération se décompose suivant les axes du système  $(D)$  (figure 3b) :

- suivant  $MX$  : 0
- suivant  $MY$  :

$$J^{(g)}(M_D^t) \sin \lambda = R \cos \lambda \sin \lambda \left( \frac{d\alpha}{dt} \right)^2$$

- suivant  $MZ$  :

$$-J^{(g)}(M_D^t) \cos \lambda = R \cos^2 \lambda \left( \frac{d\alpha}{dt} \right)^2$$

### Exemple :

un calcul simple montre que, pour une vitesse de 1 000 m/s, la force due à l'accélération de Coriolis n'est au maximum que de 1 / 70 du poids du mobile  $M$  et que celle due à l'accélération d'entraînement ne dépasse pas, à la surface de la Terre, 1/ 290 du poids.

Les trois accélérations qui entrent dans la composition de l'accélération absolue de  $M$ , multipliées par la masse  $\mu$  de  $M$ , donnent une force à laquelle s'ajoute la force due à son poids. Ainsi, pour connaître la force apparente due aux accélérations (indiquée par un accéléromètre) à laquelle  $M$  est soumis, il faut retrancher son poids.

L'accélération d'entraînement contribue à diminuer le poids apparent de  $M$ .

---

## 2. Unités



### [2.1 Unités d'accélération linéaire](#)

### [2.2 Unités d'accélération angulaire](#)

#### 2.1 Unités d'accélération linéaire

L'équation aux dimensions est  $[\gamma] = [LT^{-2}]$ . Ainsi, l'unité légale d'accélération est le **mètre par seconde carrée** ( $m/s^2$ ).

Le **centimètre par seconde carrée** ( $cm/s^2$ ) est l'unité CGS. On l'appelle **gal** (symbole : Gal). Il n'est utilisé que pour le champ de pesanteur.

### [HAUT DE PAGE](#)

#### 2.2 Unités d'accélération angulaire

On emploie le **radian par seconde carrée** ( $rad/s^2$ ) et le **tour par seconde carrée** ( $tr/s^2$ ).

On utilise fréquemment  $g$  (accélération de la pesanteur) comme unité d'accélération.

L'équation générale de la dynamique étant :

$$f = m \gamma$$

avec :

- $f$  : force appliquée
- $m$  : masse ponctuelle
- $\gamma$  : accélération résultante,

cette équation devient, dans le cas de la pesanteur :

$$p = mg$$

avec :

- $p$  : poids de l'objet ponctuel ;

d'où :

$$f = p \gamma / g$$

**Exprimer une accélération en nombre de  $g$  revient à exprimer la force agissant sur une masse  $m$  en nombre de fois son poids  $p$ .**

---

### 3. Accélération due au champ de gravitation. Définition de g



Tout corps soumis à ce champ y subit une force  $f$ .

Soit, par exemple, un corps tombant en chute libre, à Paris. Au bout de 1 s, sa vitesse sera de 9,81 m/s ; au bout de 2 s, elle sera deux fois plus grande, et ainsi de suite.

L'accélération due à la pesanteur est donc, à Paris, de 9,81 m/s<sup>2</sup> ; à l'équateur, elle est de 9,78, et, aux pôles, de 9,83 m/s<sup>2</sup>.

La valeur conventionnelle adoptée comme **accélération normale de la pesanteur** est :

$$g_n = 9,806\ 65\ \text{m/s}^2$$

alors que l'accélération de la pesanteur à 45° de latitude et au niveau de la mer est voisine de 9,806 16 m/s<sup>2</sup>.

La valeur de 9,806 65 m/s<sup>2</sup>, qui est devenue, par convention, la *valeur normale* de l'accélération de la pesanteur, avait été obtenue en divisant la valeur mesurée autrefois au Bureau international des poids et mesures (3<sup>e</sup> CGPM, 1901) par le coefficient théorique 1,000 33<sub>22</sub> de réduction à 45° de latitude et au niveau de la mer, admis à cette époque.

---

### 4. Principe des mesures. Classification



#### [4.1 Principe de la mesure de l'accélération](#)

#### [4.2 Classification des accéléromètres](#)

#### [4.2.1 Classification suivant la nature du phénomène de détection](#)


#### [4.2.2 Accéléromètres à déplacements asservis](#)

#### [4.2.3 Accéléromètres à poutres vibrantes et à ondes de surface](#)

#### [4.2.4 Classification suivant l'emploi projeté](#)

#### [4.2.5 Accéléromètres complexes et capteurs intégrés](#)

#### 4.1 Principe de la mesure de l'accélération

On ne procède qu'exceptionnellement et dans des dispositifs particuliers, ne pouvant être considérés comme des instruments courants, à la mesure des accélérations à partir de la définition rappelée dans le paragraphe 1 . On procède alors par dérivation simple de la vitesse, ou dérivation double du déplacement, obtenus généralement par voie électrique analogique.

Mais la mesure la plus couramment employée est une mesure déductive obtenue à partir de la loi fondamentale de la dynamique :

$$f = m \gamma$$

On mesure en réalité la force  $f$  à laquelle est soumise une masse  $m$  sous l'action de l'accélération  $\gamma$  considérée, cette accélération étant la résultante de toutes les accélérations auxquelles est soumise la masse  $m$  dans la direction de l'axe sensible, qu'elles soient dynamiques (mouvement) ou statiques (champ de pesanteur par exemple). Un calcul simple donne alors la valeur de  $\gamma$ .

La force  $f$  peut être évaluée suivant deux principes.

— Dans le premier cas (**accéléromètres fonctionnant en boucle ouverte**), la force est mesurée par la connaissance d'un déplacement (pouvant être micrométrique) détecté par un phénomène physique proportionnel : optique, électrique, etc. La plupart des capteurs utilisant ce principe comportent une masse inerte (appelée **masse d'épreuve** ou **masse sismique**) pouvant se déplacer en translation ou en rotation et couplée à un élément ressort susceptible d'opposer à la force d'inertie une force proportionnelle au déplacement (figure 4). Dans ces conditions, si l'extrémité libre de l'élément ressort se déplace, son élongation :

$$x_0 = x_2 - x_1$$

est proportionnelle à l'accélération :

$$d^2x/dt^2$$

Dans ce type d'accéléromètre, la sensibilité est d'autant plus grande que la raideur  $k$  de l'élément ressort est faible, ce qui est au détriment de la pulsation propre  $\omega_0$  du système et de la dynamique de mesure liée à la limite élastique du ressort [1]. En effet, si  $m$  est la masse de l'élément sensible,  $s$  la sensibilité, on a :

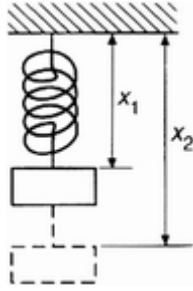
$$s = \frac{m}{k}$$

et

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

On se heurte là au compromis classique entre rapidité et précision, qu'on surmontera d'autant mieux avec des détecteurs plus sensibles.

— Dans le second cas (**accéléromètres fonctionnant en boucle fermée**, ou **asservis**), on crée une force  $f'$  égale et opposée à  $f$  à l'aide d'une variable intermédiaire assurant une forte sensibilité tout en conservant une grande raideur de liaison. On peut considérer qu'il n'y a pas de déplacements de la masse sismique, car ceux-ci sont extrêmement faibles grâce au gain élevé de la boucle.



**Figure 4** - Exemple d'élément engendrant une force proportionnelle au déplacement

## [HAUT DE PAGE](#)

### 4.2 Classification des accéléromètres

## [HAUT DE PAGE](#)

#### 4.2.1 Classification suivant la nature du phénomène de détection

Les accéléromètres non asservis, classés suivant le phénomène de détection, sont les suivants :

- à jauges de contrainte ;
- à détection piézorésistive ;
- à détection piézoélectrique ;
- à détection optique par occultation ;
- à fibres optiques ;
- à détection capacitive ;
- à réluctance variable (détection inductive).

Nous citerons ensuite, et pour mémoire, des principes peut-être encore utilisés, mais de façon confidentielle et non industrielle. Il s'agit des accéléromètres :

- à détection par effet Hall ;
- à potentiomètre ;
- à détection électromagnétique, piézo-optique ;
- à lecture directe ;
- à pendule tournant.

## [HAUT DE PAGE](#)

#### 4.2.2 Accéléromètres à déplacements asservis


Il s'agit des accéléromètres :

- à rappel électromagnétique à aimants permanents ;
- à rappel au moyen de forces d'origine électrostatique.

La boucle d'asservissement, dans les deux cas, peut être de type analogique ou numérique.

## [HAUT DE PAGE](#)

#### 4.2.3 Accéléromètres à poutres vibrantes et à ondes de surface

Bien que de type en boucle ouverte, les accéléromètres à poutres vibrantes (dénommés aussi à ondes de volume) rivalisent de précision avec les appareils asservis. Leur sensibilité est très élevée, malgré les déplacements extrêmement faibles de la masse d'épreuve. La présentation des performances de ces appareils est abordée au paragraphe [7](#) .


Classés dans la même famille, les capteurs à ondes de surface en sont au stade des études avancées en laboratoire.

#### [HAUT DE PAGE](#)

#### 4.2.4 Classification suivant l'emploi projeté

Le choix d'un accéléromètre peut être guidé par la considération d'un certain nombre de paramètres tels que : la précision, le prix, la gamme d'accélération et les conditions d'environnement.

Les paramètres les plus importants pour une application donnée sont cependant généralement l'amplitude et la fréquence du signal à mesurer. Il y a deux raisons principales à cela : on peut prévoir leur ordre de grandeur dans la plupart des applications, et ce sont des critères qui limitent assez rapidement les possibilités de choix de l'accéléromètre.

Nous avons pris l'exemple de quelques applications très importantes [8](#) .

- mesures des vibrations ;
- mesures pour la navigation par inertie ;
- mesures géographiques.

#### [HAUT DE PAGE](#)

#### 4.2.5 Accéléromètres complexes et capteurs intégrés

Les accéléromètres complexes que nous citons [9](#)  sont :

- l'accéléromètre intégrateur ;
  - l'accéléromètre angulaire ;
  - l'accéléromètre multidirectionnel.
- 

### 5. Accéléromètres non asservis



[5.1 Accéléromètres à jauges de contrainte](#)

[5.2 Accéléromètres piézorésistifs](#)

[5.3 Accéléromètres à détection piézoélectrique](#)

[5.4 Accéléromètres à détection optique par occultation](#)

[5.5 Accéléromètres à fibres optiques](#)

[5.6 Accéléromètres à détection capacitive](#)

[5.7 Accéléromètres à détection inductive](#)

## 5.1 Accéléromètres à jauges de contrainte

Une masse sismique  $M$  (figure 5) subit une force d'origine inertielle sous l'action d'une accélération appliquée au capteur suivant l'axe  $Y$ . Cette force induit des contraintes, de traction sur une face, de compression sur l'autre face, sur une poutre montée en porte-à-faux. Ces contraintes sont mesurées au moyen de jauges métalliques résistives collées sur cette poutre, généralement au nombre de quatre réparties deux par deux sur chaque face de la poutre, câblées suivant un schéma de type pont de Wheatstone (figure 6).

### Nota :

se reporter aux articles *Extensométrie* [Extensométrie](#) et *Capteurs à jauges extensométriques* [Capteurs à jauges extensométriques](#) dans le présent traité.

Les variations de contrainte dans la poutre entraînent des variations de résistance des jauges (diminution sur une face, augmentation sur l'autre), donc l'apparition d'une tension de déséquilibre du pont de mesure, fonction de l'accélération d'entrée.

- **Avantages** de ce type d'accéléromètre :
  - résolution continue ;
  - utilisation sous alimentation alternative ou continue (quelques volts, souvent  $\pm 15$  V en courant continu) ;
  - faible encombrement (masse de 0,5 à 50 g) ;
  - domaine de mesure : de  $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  à  $50\,000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  ;
  - sensibilité : typiquement 0,1 % de la pleine échelle.
  
- **Inconvénients** :
  - performances globales moyennes (précision d'environ 0,5 %) ;
  - faible niveau de sortie (sauf avec amplificateur incorporé).
  
- **Constructeur** : Entran.

## [HAUT DE PAGE](#)

## 5.2 Accéléromètres piézorésistifs

Ce type d'appareil est une variante plus actuelle de l'accéléromètre à jauges de contrainte métalliques. Celles-ci sont remplacées par des résistances de silicium polycristallin ou monocristallin.

Dans l'une des configurations les plus courantes, la poutre en porte-à-faux présentée au paragraphe précédent est usinée dans un barreau de silicium et le pont piézorésistif est formé par implantation ionique ou par procédé de diffusion. Les contraintes mécaniques induites par l'accélération imposée au capteur occasionnent un changement de résistivité des piézorésistances implantées.

Une autre technologie, encore au stade des recherches, tend à employer un pont de détection à base de transistors bipolaires piézosensibles, avec, comme particularité, une consommation très faible du pont.

- **Avantages** des accéléromètres piézorésistifs :
  - faible coût ;
  - résolution continue ;
  - très faible encombrement (typiquement masse de 0,5 à 5 g) ;
  - forte sensibilité du pont de jauges (de 10 à 100 fois supérieure à celle des jauges résistives métalliques) ;
  - domaine de mesure : de  $\pm 10$  à  $50\,000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .
  
- **Inconvénients** :
  - performances globales moyennes (précision d'environ 0,5 %) ;
  - sensibilité en température assez élevée (de 0,05 % de l'étendue de mesure par degré Celsius à 0,1 % par degré Celsius).
  
- **Constructeurs** : Entran, IC Sensors, Lucas, Metravib, Motorola, Nippon Denso, Nova Sensor, Sensoror.

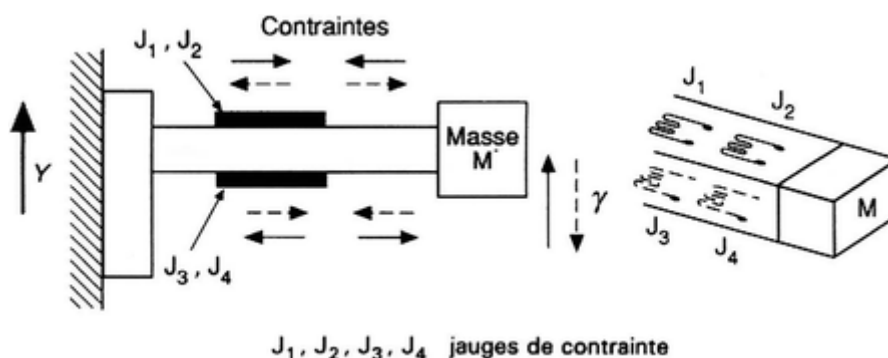
## HAUT DE PAGE

### 5.3 Accéléromètres à détection piézoélectrique

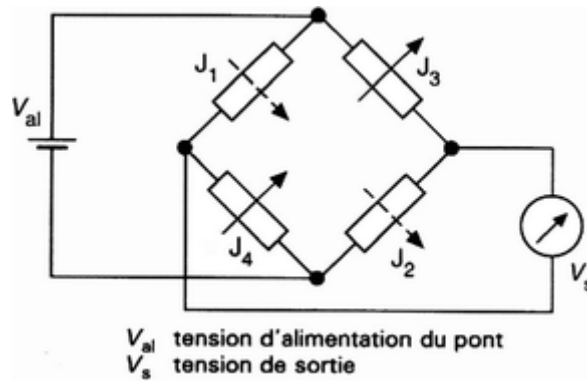
Il existe un grand nombre d'accéléromètres de ce type. Tous utilisent un matériau piézoélectrique synthétique, généralement une céramique susceptible de générer des charges électriques proportionnelles aux forces qui lui sont appliquées.

Une masse sismique soumise à l'accélération à mesurer exerce des efforts de compression ou de cisaillement sur le matériau piézoélectrique. Le signal électrique fourni est proportionnel à l'accélération (figure 7).

Du point de vue électrique, ce type d'appareil est un générateur de charge à haute impédance de source ; compte tenu des fuites du matériau piézoélectrique, ces accéléromètres ne peuvent pas mesurer les accélérations continues. Un câble coaxial relie le capteur à un amplificateur de charge, la distance entre les deux appareils pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres.



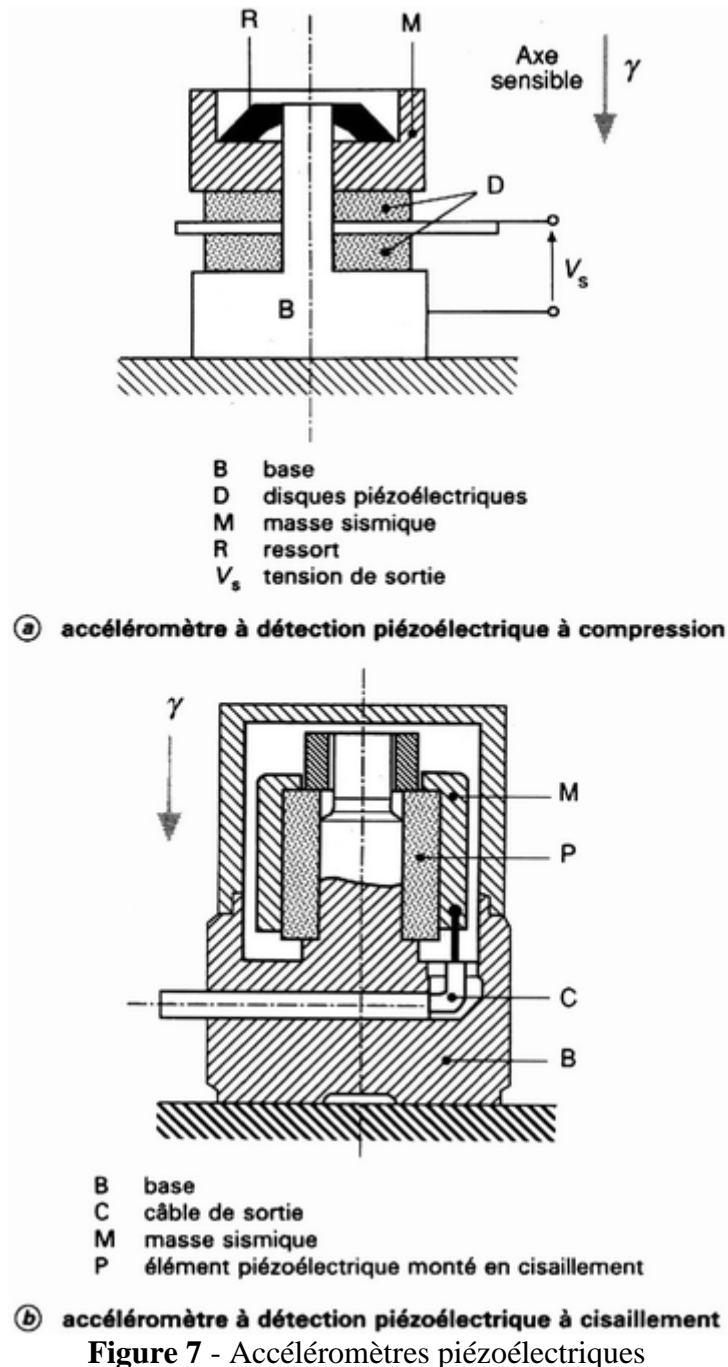
**Figure 5** - Accéléromètre piézorésistif à jauges de contrainte



**Figure 6** - Câblage des jauges de contrainte

Certains accéléromètres comportent un préamplificateur conditionneur incorporé, permettant une sortie basse impédance et une longueur de câble pouvant aller jusqu'à 1 km. L'alimentation du capteur et le signal de sortie utilisent le même câble de liaison, bifilaire.

Les gammes de fréquence des accélérations mesurables s'étendent de 0,2 à 50 000 Hz, et les niveaux d'accélération de  $10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  à plus de  $10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  en service permanent.



En règle générale, la température maximale d'utilisation pour les modèles courants est de 250 °C. Pour les cas limites, certains accéléromètres peuvent fonctionner jusqu'à 700 °C. Dans les applications cryogéniques, d'autres appareils supportent - 200 °C en service permanent.

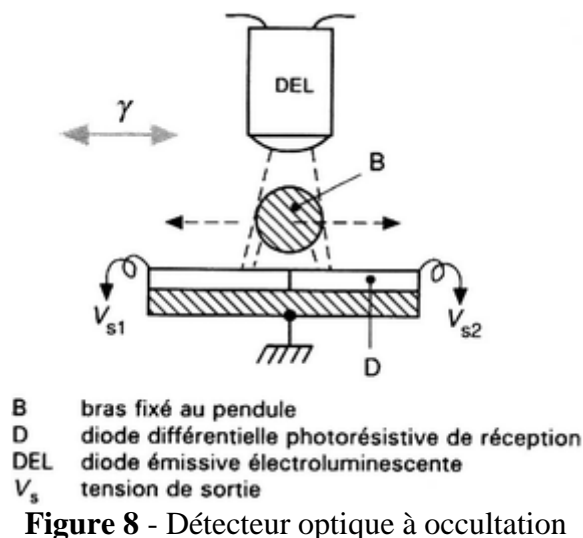
- **Avantages** de ce type d'accéléromètre :
  - réponse en fréquence élevée ;
  - pas d'alimentation en général (sauf version à électronique incorporée) ;
  - petites dimensions possibles ;
  - solidité et fiabilité.

- **Inconvénients :**
  - limitation en basse fréquence (ne peut pas mesurer les accélérations statiques) ;
  - précision moyenne (1 à 2 %) ;
  - sensibilité thermique assez élevée.
  
- **Constructeurs :** Bruel et Kjaer, Endevco, Sensorex, Vibro-Meter.

## HAUT DE PAGE

### 5.4 Accéléromètres à détection optique par occultation

Une source lumineuse, constituée par une diode électroluminescente, a son faisceau émissif centré sur une diode réceptrice de type différentiel et photorésistif. Ces deux composants sont fixés au bâti fixe du capteur (figure 8).



**Figure 8** - Détecteur optique à occultation

La masse sismique à rappel classique comporte un bras qui vient occulter le faisceau émis par la diode. En l'absence d'accélération, le bras est centré sous le faisceau et les deux secteurs de la photorésistance reçoivent la même quantité de lumière. Le pont détecteur est donc équilibré et la tension de sortie nulle.

Sous l'effet d'une accélération agissant sur la masse sismique, le bras se déplace sous le faisceau, permettant ainsi une augmentation de la quantité de lumière reçue sur un des secteurs de réception, et une diminution égale sur l'autre.

La tension de déséquilibre du pont photorésistif est donc l'image de l'accélération imposée.

- **Avantages** de ce type d'accéléromètre :
  - insensibilité au champ magnétique ;
  - aucune perturbation mécanique apportée ;
  - faible consommation.
  
- **Inconvénients :**

- sauf en cas d'emploi en détecteur de zéro pour accéléromètre asservi, performances modestes : un tel accéléromètre en boucle ouverte serait d'une classe de 2 à 5 % ;
- sensibilité thermique assez forte (sauf si un circuit de compensation est ajouté).

## HAUT DE PAGE

### 5.5 Accéléromètres à fibres optiques

#### **Nota :**

pour les principes généraux, se reporter à l'article *Capteurs à fibres optiques* [R 415] dans le présent traité.

On distingue deux catégories de capteurs accélérométriques à fibres optiques ; ces accéléromètres sont en cours de développement.

— Les **capteurs intrinsèques**, caractérisés par le fait que le paramètre devant être mesuré agit directement sur la propagation de la lumière dans la fibre.

Les actions possibles sont multiples, comme par exemple un changement local d'indice, un changement de la longueur de fibre ou encore un changement d'intensité lumineuse par courbure de la fibre. La figure 9 décrit un accéléromètre de ce dernier type. La masse sismique soumise à l'accélération vient modifier la courbure de la fibre, occasionnant des pertes. Le phénomène est quasi linéaire.

— Les **capteurs extrinsèques**, caractérisés par le fait que le paramètre à mesurer agit directement sur les propriétés du faisceau lumineux à travers un milieu *extérieur* à la fibre.

On peut citer des appareils à modification de couplage, à occultation de faisceau et à réflexion.

## HAUT DE PAGE

### 5.6 Accéléromètres à détection capacitive

Ces accéléromètres sont, la plupart du temps, des accéléromètres dits « **pendulaires** ».

Une masse sismique en forme de plaque, ou **pendule**, est fixée à un bâti par l'intermédiaire de charnières faisant office de ressorts de rappel (figure 10). Sous l'action d'une accélération imposée suivant l'axe sensible, le pendule tourne d'un angle  $\alpha$  tel que :

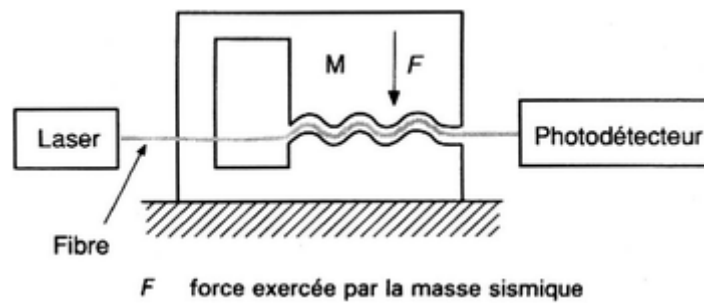
$$\alpha = C / \rho$$

avec :

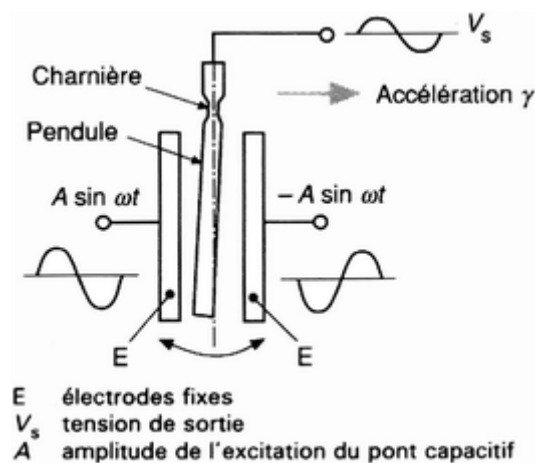
- $C$  : couple d'origine inertielle autour de l'axe charnière
- $\rho$  : raideur angulaire du pendule.

Cet angle  $\alpha$ , à variation linéaire en fonction de l'accélération, est mesuré au moyen d'un détecteur à pont capacitif. D'une façon générale, une électrode isolée est fixée sur le pendule en regard de deux électrodes fixes, situées de part et d'autre des faces pendulaires à une faible distance (de quelques micromètres à quelques dizaines de micromètres).

Deux tensions alternatives égales et en opposition de phase sont appliquées sur les électrodes fixes. La tension résiduelle, recueillie sur l'électrode pendulaire, quantifie le déséquilibre du pont.



**Figure 9** - Accéléromètre à courbure de fibre optique



**Figure 10** - Principe de la détection capacitive

Les versions à faible coût de ce capteur tendent à être employées pour des applications en sécurité automobile car son bon fonctionnement peut être vérifié facilement à distance. On envoie sur l'une des électrodes fixes un échelon de tension qui simule une accélération par le biais de la force électrostatique engendrée. Cette force occasionne une rotation du pendule qui est immédiatement détectée.

Les versions asservies, de plus grande précision, sont décrites dans le paragraphe [9.3](#)

Le tableau [1](#) établit des comparaisons entre la détection capacitive et les détections piézoélectrique et piézorésistive.



# Comparaison entre différentes technologies de détecteurs accélérométriques

Caractéristiques	Détection		
	capacitive	piézo- électrique	piézo- résistive
Impédance	haute	haute	basse
Taille	grande	petite	moyenne
Gamme de température	large (250 °C)	très large (300 °C)	moyenne (100 °C)
Erreur de linéarité	grande	moyenne	faible
Réponse en continu	oui	non	oui
Réponse en alternatif (Hz)	large (500)	très large (10 000)	moyenne (100)
Amortissement	possible	difficile à réaliser	possible
Sensibilité	élevée	moyenne	moyenne
Circuit électronique associé	oui	oui	pas obligatoire
Coût (relatif)	élevé (2)	élevé (3)	faible (1)

## Comparaison entre différentes technologies de détecteurs accélérométriques

- **Avantages** de ce type de capteur :
  - bande passante élevée : du continu à plus de 1 000 Hz, suivant les versions ;
  - faible sensibilité en température : par exemple, 2 % de la pleine échelle de – 25 à + 75 °C en boucle ouverte ;
  - bonne précision (jusqu'à 0,1 %) ;
  - étendue de mesure : de 10 à 10 000  $m \cdot s^{-2}$ .
- **Inconvénient** :
  - schéma électronique associé plus complexe que pour les appareils piézorésistifs.
- **Constructeurs** : Access Sensor, CSEM, Endevco, SAGEM, Sextant Avionique, Vectavib.

[HAUT DE PAGE](#)

### 5.7 Accéléromètres à détection inductive

Ce type d'appareil possède un système de détection de l'amplitude du mouvement élastique de la masse sismique basé sur le principe du transformateur différentiel (figure 11).

Le primaire, lié au boîtier accélérométrique, est constitué de deux enroulements identiques connectés en série mais de sens opposés et situés de part et d'autre de la masse sismique sur laquelle est fixé le secondaire du transformateur.

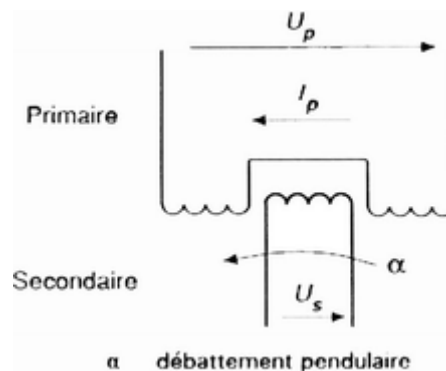
Le primaire génère donc deux flux magnétiques alternatifs égaux et en opposition de phase.

En l'absence d'accélération, la masse d'épreuve reste centrée ; les deux flux traversant la bobine secondaire sont égaux et opposés, la tension différentielle à ses bornes est alors nulle.

Sous l'effet d'une accélération déplaçant la masse sismique, les deux flux traversant la bobine varient, l'un croît, l'autre décroît ; il apparaît alors aux bornes de la bobine une tension différentielle non nulle, dont l'amplitude est liée au décalage de cette masse, et dont la phase par rapport au signal inducteur indique le sens du déplacement.

Ce type de détection est aussi employé sur des versions accélérométriques à déplacements asservis, au même titre que le détecteur capacitif.

- **Constructeurs** : Kearfott, SAGEM, Sensorex.



**Figure 11** - Principe de la détection inductive

## 6. Accéléromètres à déplacements asservis



### [6.1 Asservissement analogique](#)

### [6.2 Asservissement numérique](#)

Les accéléromètres pendulaires asservis sont les instruments les plus couramment utilisés pour les mesures accélérométriques de moyenne et haute précision.

Dans ces appareils, la force d'origine inertielle appliquée à une masse d'épreuve et tendant à la déplacer est compensée par une force égale et opposée créée par un système moteur dont la commande constitue la mesure de l'accélération.

Plus précisément, l'action inertielle sur la masse sismique provoque d'abord un microdéplacement de celle-ci qui déclenche aussitôt une réaction du moteur couple, la ramenant à sa position initiale. Le gain de la boucle électronique liant le détecteur à l'actionneur est tel que les déplacements de la masse d'épreuve sont extrêmement faibles, réduisant ainsi les erreurs dues aux variations de position.

Les réalisations sont très diversifiées.

Le détecteur de position peut être :

- optique ;
- capacitif ;
- inductif.

De même, le système moteur peut être :

- électrostatique (une solution de ce type est décrite au paragraphe [9.3](#)) ;
- électromagnétique à aimants permanents.

La précision des appareils asservis est en général bien meilleure ( $\pm 0,01$  % ou mieux) que celle des capteurs non asservis. Ils sont très performants pour mesurer des phénomènes lentement variables et leur bande passante s'étend du continu à quelques centaines de hertz.

Le seuil de détection est en général inférieur à  $10^{-5}$  m/s<sup>2</sup> et leur étendue de mesure supérieure à 100 m/s<sup>2</sup>. Des versions biaxiales, ou triaxiales, à un seul boîtier existent.

Deux types d'asservissement sont proposés : analogique ou numérique.

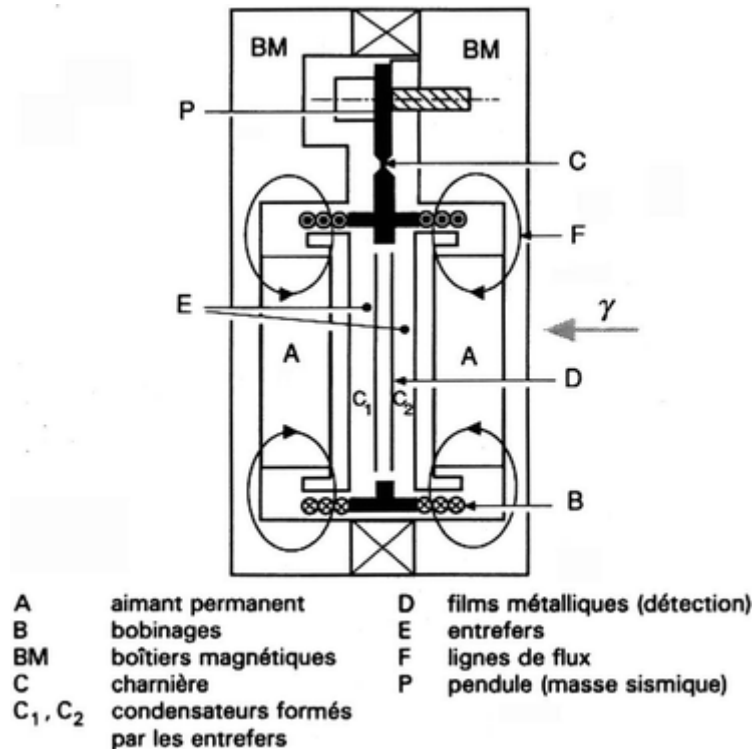
- **Constructeurs** : Ferranti, JAE, Kearfott, Litef, Litton, ONERA, SAGEM, Sensorex, Septa, Sextant Avionique, SFIM, Sundstrand Data Control, Systron Donner.

Généralement, la boucle d'asservissement comporte un système intégrateur qui donne un gain très grand (théoriquement infini en continu), rendant l'erreur d'asservissement infime.

## 6.1 Asservissement analogique

La tension fournie par le déséquilibre du détecteur agit directement, par l'intermédiaire d'une boucle d'asservissement linéaire, sur le générateur de la force compensatrice et l'information « *accélération* » se présente sous la forme d'une tension continue proportionnelle à l'accélération.

À titre d'exemple, nous décrirons succinctement un **accéléromètre miniature monoaxe SAGEM** (figure [12](#)).



**Figure 12** - Accéléromètre pendulaire électromagnétique asservi

La masse d'épreuve est constituée d'un support sur lequel sont fixés deux bobines motrices et un disque de détection ; le tout étant articulé autour d'un axe défini par une ligne de charnières réalisée au moyen de deux amincissements flexibles, formant ainsi un ensemble pendulaire.

Les métallisations appliquées sur les faces du disque détecteur isolant constituent, avec les faces internes des boîtiers, les armatures de deux condensateurs variables dont l'ensemble forme un pont capacitif de détection des mouvements pendulaires.

Deux aimants permanents insérés dans le circuit magnétique génèrent des champs magnétiques radiaux dans deux entrefers circulaires englobant les bobinages moteurs. La force de rappel du pendule est :

$$F = B L I$$

avec :

- $B$  : induction dans l'entrefer
- $L$  : longueur développée des bobinages
- $I$  : intensité du courant de rappel.


L'accélération est donc proportionnelle à l'intensité du courant dans ce qui est défini comme étant un moteur couple de rappel.

Les faibles entrefers existant entre électrodes fixe et mobile assurent par ailleurs l'amortissement des mouvements pendulaires, par action sur le gaz neutre qui baigne

l'appareil. Des spiraux très fins réalisent les liaisons électriques (pont détecteur et bobinages de moteurs-couples).

## [HAUT DE PAGE](#)

### 6.2 Asservissement numérique

La constitution fonctionnelle de l'appareil, telle que nous l'avons décrite au paragraphe [6.1](#) , est la même, mais le bouclage électrique est de nature différente.

Dans ce type d'asservissement, un système à seuil situé après le détecteur permet d'envoyer un ordre calibré de recalage au générateur de force de recentrage, à chaque fois que la tension de sortie du détecteur dépasse ce seuil.

On utilise donc une boucle d'asservissement non linéaire ; l'information « *accélération* » se présente sous la forme d'un certain nombre d'impulsions délivrées durant une période déterminée (on parle ainsi, à titre d'exemple, de facteur d'échelle de 400 impulsions par seconde et par  $g$  ).

Suivant l'application visée, les signaux appliqués aux bobinages de rappel seront de formes différentes.

Le principal **avantage** de l'asservissement numérique est de pouvoir délivrer une information directement utilisable par un ordinateur.

---

## 7. Accéléromètres à poutres vibrantes et à ondes de surface



### [7.1 Accéléromètres à poutres vibrantes](#)

### [7.2 Accéléromètres à ondes de surface](#)

#### 7.1 Accéléromètres à poutres vibrantes

Dans les accéléromètres à poutres vibrantes, c'est une variation de fréquence qui mesure l'accélération avec une excellente précision.

Ces appareils sont basés sur le principe suivant : un transducteur force-fréquence comporte une poutre en quartz vibrant à sa fréquence fondamentale de flexion. Sous l'effet d'une accélération  $\gamma$ , une masse sismique vient contraindre la poutre et modifier sa fréquence de vibration  $\nu_0$ , qui devient :

$$\nu_1 = \nu_0 + K_1 \gamma + f(\gamma)$$

$f(\gamma)$  étant une fonction d'ordre égal ou supérieur à 2.

Pratiquement la plupart des appareils existants comportent deux transducteurs dans lesquels l'accélération impose une contrainte de compression pour l'un, une contrainte de traction pour l'autre. Pour une accélération positive par exemple :

$$v_1 = v_0 + K \gamma + f_1(\gamma)$$

$$v_2 = v_0 - K \gamma + f_2(\gamma)$$

La différence des fréquences  $v_1 - v_2$  est approximativement linéaire :

$$v_1 - v_2 = 2 K \gamma \text{ car } f_1(\gamma) \text{ est peu différent de } f_2(\gamma)$$

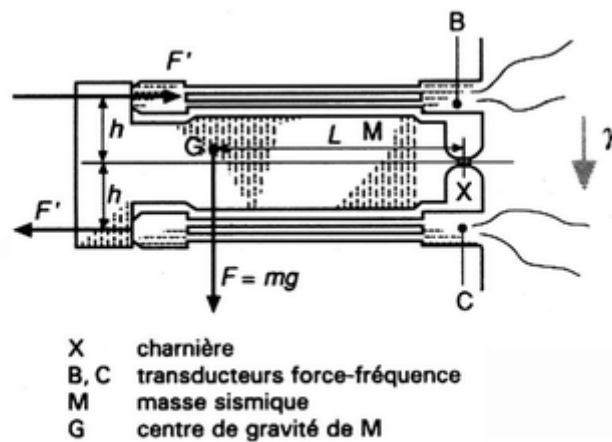
Ces appareils, relativement simples de construction, ne consomment pratiquement pas d'énergie (environ  $1,5 \cdot 10^{-8} \text{ W}$  pour les deux oscillateurs associés aux transducteurs). Leur précision rivalise avec celle des meilleurs accéléromètres à déplacements asservis. La stabilité du facteur d'échelle, en particulier, est excellente.

Un exemple de réalisation est décrit sur la figure 13.

Les transducteurs force-fréquence sont réalisés au moyen de processus photolithographique. Pour éviter que l'encastrement des poutres de quartz ne dégrade leurs caractéristiques de résonateurs (notamment facteur de surtension), on utilise des formes de poutres qui peuvent être parfois compliquées. Les formes les plus simples sont du type double diapason (figure 14) ou trilame.

Ces poutres travaillent généralement sous vide pour minimiser les pertes d'énergie.

La sensibilité peut atteindre  $10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .



Le couple inertiel  $FL$  est égal au couple de réaction sur les transducteurs  $2 F' h$ .

Figure 13 - Accéléromètre plat à poutres vibrantes (SAGEM)

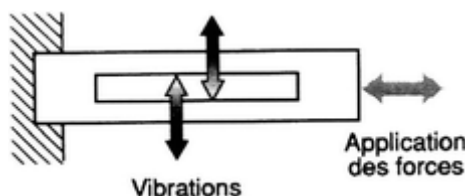


Figure 14 - Transducteur force-fréquence de type double diapason

Les gammes dynamiques de mesure s'étendent, suivant le cas, de quelques dixièmes de  $g$  à plusieurs milliers de  $g$ .

La linéarité et la stabilité du facteur d'échelle avoisinent  $10^{-6}$ .

Un des **inconvenients** de ce type d'accéléromètre est une relative fragilité en tenue aux vibrations. En effet, chaque couple formé par un transducteur force-fréquence et la masse sismique associée constitue un système masse-ressort ayant une résonance très peu amortie. On réduit l'inconvénient qui en résulte soit en employant divers dispositifs d'amortissement (films gazeux ou amortisseur dynamique), soit en diminuant la valeur des masses sismiques, ce qui diminue la sensibilité du capteur, mais augmente la fréquence de résonance parasite hors des spectres rencontrés par ces appareils.

Des versions miniaturisées sont actuellement étudiées. Dans la plupart des cas, la tendance est à l'utilisation du silicium comme matériau de base.

- **Constructeurs** : Kearfott, ONERA, SAGEM, Sundstrand Data Control, Systron Donner, Switek.

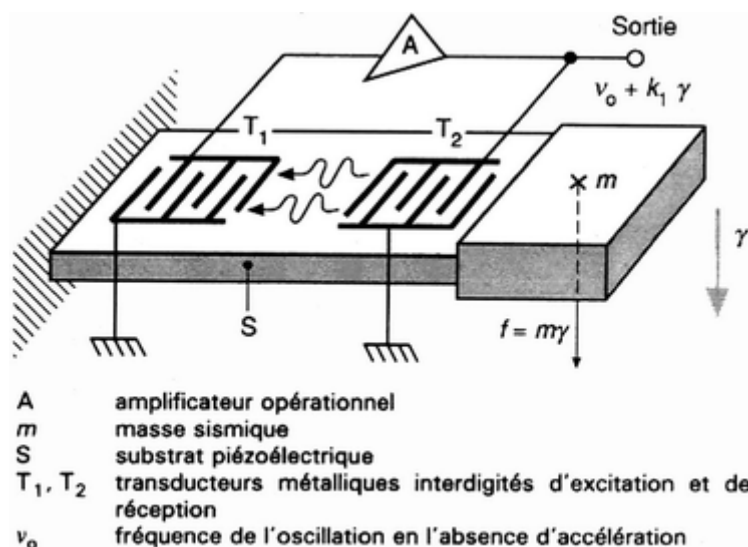
## HAUT DE PAGE

### 7.2 Accéléromètres à ondes de surface

Les capteurs à ondes de surface sont constitués d'oscillateurs obtenus en bouclant une ligne à retard à transducteurs de surface interdigités, au moyen d'un amplificateur opérationnel (figure 15).

Chaque transducteur est formé de deux électrodes métalliques en forme de peigne.

Les transducteurs permettent, grâce au champ électrique créé par la tension alternative appliquée aux électrodes, de générer des ondes se déplaçant à la surface du substrat, ce dernier étant en matériau piézoélectrique (quartz, tantalate de lithium, etc.). Ces ondes ont une longueur d'onde égale à la distance séparant deux électrodes consécutives d'un même peigne. La fréquence est plus précisément définie par le retard  $\tau$  de la ligne.












## Figure 15 - Accéléromètre à ondes de surface

Dans le cas des accéléromètres, une masse d'épreuve est liée au substrat piézoélectrique et déforme celui-ci en flexion, sous l'action d'une accélération appliquée au capteur. Cette déformation entraîne une variation dimensionnelle de la ligne, entraînant une variation du retard  $\tau$  et donc une variation de la fréquence propre de l'oscillateur dont la mesure quantifie l'accélération appliquée.




Un des **problèmes** liés à ce type de capteurs concerne leur grande sensibilité thermique. On tend à combler cet handicap en utilisant deux voies de mesure, l'une au-dessus de la poutre, l'autre en dessous, de façon à ce que les contraintes de tension et compression antagonistes entraînent des variations opposées de fréquence. Le facteur d'échelle de l'appareil est ainsi doublé, et ce mode différentiel minimise les erreurs communes en température.

Ces accéléromètres en sont au stade des études avancées de laboratoire, et dans le cas probable d'un développement, devraient mener à des capteurs de petites dimensions (volume inférieur au  $\text{cm}^3$ ) et de faible coût, car réalisés au moyen de procédés collectifs à base de photolithographie.

L'étendue de mesure peut atteindre plus de  $2\,000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ . La précision serait estimée de  $10^{-3}$  à  $10^{-4}$  de la pleine échelle.

- **Constructeurs** : Laboratoire de Physique et Métrologie des Oscillateurs LPMO (Besançon), Thomson.
- 
- 8. Applications
  - 
  - [8.1 Mesures de vibrations](#)
  - [8.2 Mesures des accélérations pour la navigation par inertie](#)
  - [8.3 Mesures géographiques](#)
  - 8.1 Mesures de vibrations
  - Ces mesures constituent le domaine d'application le plus vaste des accéléromètres. On choisira des appareils susceptibles de mesurer des accélérations périodiques, généralement à fréquence et intensité élevées.
  - Les accéléromètres à jauges de contrainte [5.1](#) , piézorésistifs [5.2](#) , à détection optique par occultation et à fibres optiques (§ [5.4](#)  et [5.5](#) ) satisfont ces conditions, surtout en basse fréquence et pour des mesures sans précision importante.
  - Les accéléromètres à détection capacitive [5.6](#)  ont une bande passante plus élevée.
  - Les appareils piézoélectriques [5.3](#)  utilisables pour des fréquences élevées conviennent également à cet emploi. Toutefois, lorsqu'on désire une très bonne précision, ou lorsqu'il faut mesurer des accélérations à très faible fréquence ou en continu, les capteurs de type asservi [6](#)  sont recommandés.
  - **Nota** :
  - se reporter à l'article *Vibrations des structures industrielles*  [R 3 140] dans le présent traité.
  - [HAUT DE PAGE](#)
  - 8.2 Mesures des accélérations pour la navigation par inertie
  - La navigation inertielle est basée sur le calcul des coordonnées d'un mobile à partir, principalement, des mesures des composantes des accélérations auxquelles il est

soumis. Cette navigation requiert des mesures très précises, par exemple de 0 à 10 g à  $10^{-5}$  g près. Cette méthode, universellement répandue, permet de s'affranchir des mesures magnétiques, optiques ou électromagnétiques (navigation sous-marine, navigation polaire, astronautique, etc.).

- Un équipement standard de navigation inertielle comprend habituellement trois accéléromètres, ainsi que trois gyroscopes comme référence d'orientation.
  - La position du mobile et sa vitesse sont obtenues par intégration des informations accélérométriques.
  - Les accéléromètres convenant à cette importante application entrent dans la classe des accéléromètres à déplacements asservis [6](#)  et des accéléromètres à poutres vibrantes [7](#) . Cependant, dans certains cas où une extrême précision est requise, on emploie des accéléromètres intégrateurs [9.1](#) .
  - [HAUT DE PAGE](#)
  - 8.3 Mesures géographiques
  - Les accéléromètres destinés principalement aux travaux scientifiques portant sur la mesure de haute précision de la gravité et sur la détermination des positions des repères trigonométriques doivent avoir une grande sensibilité ; mais l'étendue de mesure est faible, les accélérations objets de la mesure étant quasi constantes.
- 

## 9. Accéléromètres complexes et capteurs intégrés




[9.1 Accéléromètre intégrateur](#)

[9.2 Accéléromètre angulaire](#)

[9.3 Accéléromètres multidirectionnels](#)

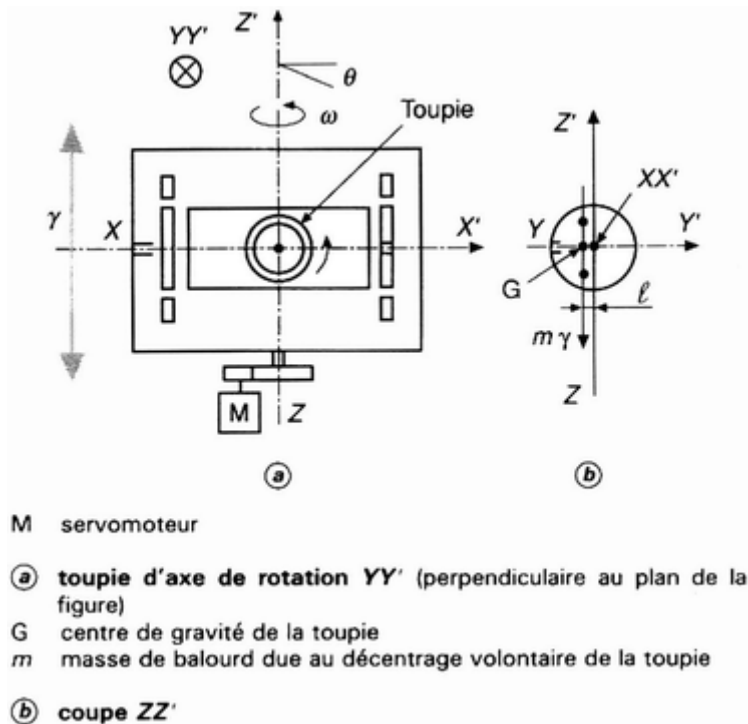
[9.4 Microaccéléromètres. Accéléromètres intégrés](#)

### 9.1 Accéléromètre intégrateur

Cet appareil fournit la valeur de l'accélération et en réalise aussitôt l'intégration. Son application concerne principalement les besoins de la navigation dite *par inertie* [8.2](#)  où l'accélération n'est qu'une étape donnant la vitesse qui, elle-même intégrée, fournit la valeur du chemin parcouru. Cependant, l'intégration est ici réalisée par le jeu même de l'agencement mécanique de l'appareil et non par l'emploi d'un dispositif intégrateur indépendant.

Le modèle le plus répandu de ce type de matériels et ayant donné lieu à diverses variantes est celui utilisant un gyroscope balourdé (figure [16](#)).

Dans ces dispositifs, l'agencement général est celui du gyroscope dit à *un degré de liberté*. Sa réalisation habituelle est celle du *gyroscope flottant*.



**Figure 16** - Accéléromètre gyroscopique intégrateur

Dans un cylindre flotteur pivotant autour de son axe  $XX'$  se trouve une toupie dont l'axe  $YY'$  est perpendiculaire à  $XX'$ .

Une masse de balourd  $m$  affecte l'ensemble du flotteur créant un couple autour de  $XX'$ , sous l'effet d'une accélération  $\gamma$ . Cela peut être obtenu en décentrant la masse de la toupie, son centre de gravité  $G$  étant distant de l'axe  $XX'$  de la quantité  $\ell$ .

Sur la figure 16, l'axe  $ZZ'$  de sensibilité aux accélérations est vertical. Une accélération  $\gamma$  soumet le flotteur à un couple qui tend à le faire précessionner (vitesse angulaire  $\omega$ ) autour de l'axe  $ZZ'$ . Les pivots suivant  $XX'$  interdisant cette liberté, ce couple agit sur le flotteur comme si la toupie ne tournait pas et le met en rotation autour de  $XX'$ .

Cette rotation est détectée et commande la rotation du gyroscope autour de  $ZZ'$  par le moyen du mécanisme  $M$ . La réaction gyroscopique agit alors en créant un couple de valeur  $H\omega$  autour de  $XX'$  ( $H$  est le moment cinétique de la toupie et  $\omega$  la vitesse de rotation autour de  $ZZ'$ ) s'opposant au couple de balourd  $m\gamma\ell$  à  $\varepsilon$  près et ramenant le flotteur dans sa position initiale ( $\varepsilon$  est réductible à des valeurs très faibles par la perfection des exécutions et l'emploi de circuits correcteurs). Dans cet appareil, on oppose au couple de balourd le couple gyroscopique  $H\omega$ , ce qui permet de « peser » le balourd  $m\gamma\ell$ .

Dans ces conditions, la vitesse  $\omega$  est la mesure de l'accélération  $\gamma$ ; l'angle  $\theta$  parcouru autour de  $ZZ'$  traduit la vitesse  $v$  du mobile. En effet, l'égalité des couples s'écrit :

$$H\omega = m\gamma\ell$$

d'où par intégration :

$$H\theta = m v \ell$$

- **Constructeur : SAGEM.**

## HAUT DE PAGE

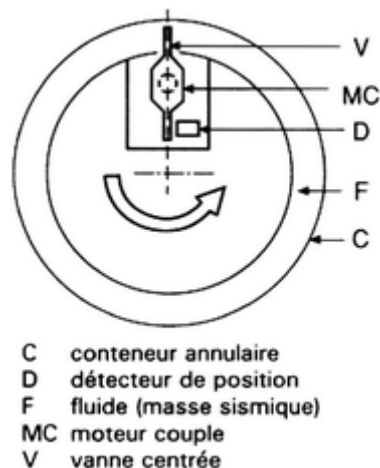
### 9.2 Accéléromètre angulaire

Cet appareil est conçu pour mesurer l'accélération angulaire de mobiles tournants. On l'emploie surtout en aéronautique pour des fonctions de contrôle et de stabilisation.

Tous les accéléromètres linéaires peuvent théoriquement mesurer des accélérations angulaires par le biais de phénomènes centrifuges et de traitement du signal par dérivation. Toutefois, il faut alors employer deux appareils déjà complexes pour obtenir une bonne précision.

Un des types les plus fréquemment rencontrés est l'**accéléromètre angulaire à fluide**.

Dans ce capteur, la masse sismique est constituée par un fluide enfermé dans un anneau circulaire (figure 17). Ce senseur étant de type asservi, on trouvera un ensemble comportant une vanne, liée à un système de détection de sa position angulaire et à un moteur couple de rappel.



**Figure 17** - Accéléromètre angulaire Systron Donner

Lorsqu'une accélération angulaire est appliquée au système, la masse de fluide tend à déplacer la vanne mécanique de sa position neutre, le détecteur de position délivre alors un signal, à travers un circuit électronique à gain élevé, sur le moteur couple ; celui-ci ramène la vanne en position médiane. Le courant dans l'enroulement du moteur couple est la mesure de l'accélération appliquée au capteur.

Suivant les modèles, la gamme des accélérations mesurables s'étend de  $\pm 0,1 \text{ rad /s}^2$  à  $\pm 200 \text{ rad /s}^2$ .

- **Constructeurs :** Columbia (distribué par Mecaptelec), Systron Donner.

## HAUT DE PAGE

### 9.3 Accéléromètres multidirectionnels

Dans ces appareils, par ailleurs de principes classiques, la masse sismique a la possibilité de se mouvoir suivant deux ou trois axes orthogonaux, ou **axes d'entrée**.

- La SAGEM a ainsi développé un **capteur deux axes**, de type électromagnétique asservi.

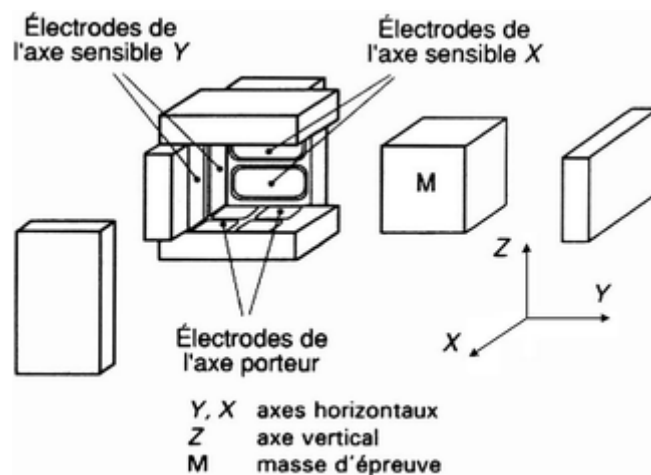
Le pendule, comportant quatre bobines de rappel et deux systèmes capacitifs de détection, est relié aux pièces fixes au moyen d'une articulation à double charnière, assurant deux degrés de liberté. Cet appareil remplace ainsi deux accéléromètres monoaxes placés suivant deux directions orthogonales.

- L'ONERA a développé un **accéléromètre triaxial** (figure 18) conçu pour une étude de gravimétrie sur satellite. La masse sismique parallélépipédique est suspendue électrostatiquement dans un champ électrostatique asservi au moyen d'électrodes planes.

Ce système permet la détection capacitive des déplacements de la masse d'épreuve ainsi que l'application de forces électrostatiques de recentrage, chaque face de la masse sismique formant, avec les électrodes en regard, les armatures de condensateurs.

À noter qu'il n'y a pas de charnière dans l'appareil, les forces de rappel, agissant suivant trois axes orthogonaux, permettant une parfaite lévitation de la masse d'épreuve.

Par un traitement approprié des signaux de sortie, on peut mesurer l'accélération appliquée au capteur suivant une direction quelconque (accéléromètre pluridirectionnel).



**Figure 18** - Accéléromètre triaxial ONERA

Le principal avantage de ces capteurs pluridirectionnels est le gain de place, apprécié dans le cœur des centrales inertielles. On notera cependant qu'en moyenne les performances sont dégradées par rapport aux capteurs uniques (de 20 à 50 %).

- **Constructeurs** : SAGEM, SFIM, ONERA.

## HAUT DE PAGE

### 9.4 Microaccéléromètres. Accéléromètres intégrés

Une nouvelle génération de capteurs accélérométriques est apparue au cours des années 80. Elle comprend des accéléromètres fabriqués suivant des processus utilisés en microélectronique. Le matériau de base est le plus souvent du silicium, quelquefois du quartz, sous forme de *wafers* (plaquette).

Les formes des pièces sont obtenues au moyen de photomasquages et d'usinages chimiques, ioniques, sélectifs (ou autres techniques de photolithographie).

Ces procédés de fabrication sont de type collectif et, suivant les dimensions, on peut obtenir jusqu'à plusieurs centaines de pièces sur un même substrat (dimensions actuelles maximales 3" × 3", soit 7,5 cm × 7,5 cm).

On peut classer ces capteurs microniques en deux catégories :

- **les capteurs miniatures** : ces appareils font appel aux microtechnologies et leurs dimensions sont millimétriques ; les différentes pièces constituant la cellule détectrice (généralement 2 ou 3) sont assemblées par adhérence thermoélectrique, voire par collage ;
- **les capteurs subminiatures** : ces senseurs font appel aux nanotechnologies et les dimensions sont submillimétriques ; au moyen de techniques très sophistiquées, l'appareil au complet est usiné dans un même substrat de silicium.

Pour ces deux catégories d'accéléromètres, les circuits électroniques, associés, le plus souvent en boucle ouverte, ont un encombrement très supérieur à celui de la cellule mécanique.

Cependant, en ce qui concerne les capteurs subminiatures, la tendance est d'incorporer, sur le même substrat de silicium, cellule mécanique et circuit électronique associés. On obtient ainsi des accéléromètres intégrés.

À titre d'exemples, les figures [19](#) et [20](#) représentent deux types d'accéléromètres miniaturisés. Sur la figure [19](#), l'accéléromètre très miniaturisé (dimensions : quelques millimètres) est réalisé en trois parties thermoadhérentes. Les espaces interélectrodes sont de quelques micromètres.

La figure [20](#) représente un accéléromètre extra-plat et monobloc. La réalisation est un peigne, le rappel électromagnétique (aimants non représentés) et la détection capacitive [6].

La société Analog Devices (États-Unis) présente un capteur électrostatique de type interdigité, en silicium, avec l'implantation de tout le circuit électronique sur le même substrat (figure [21](#)).

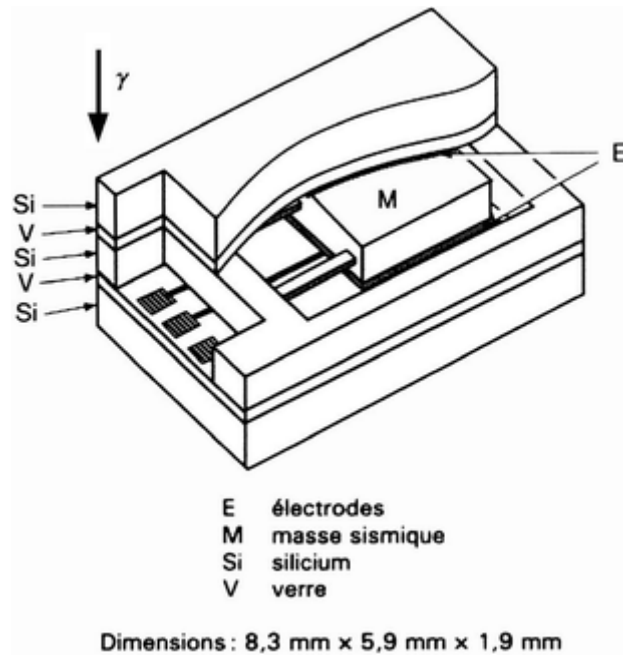
Les principes physiques régissant le fonctionnement de ces appareils sont par ailleurs tout à fait classiques ; le senseur, en principe du type pendulaire, est toujours basé sur la loi  $f = m \gamma$ . La détection est du type capacitif ou à jauges de contrainte.

Les **avantages** de ces microstructures sont les suivants :

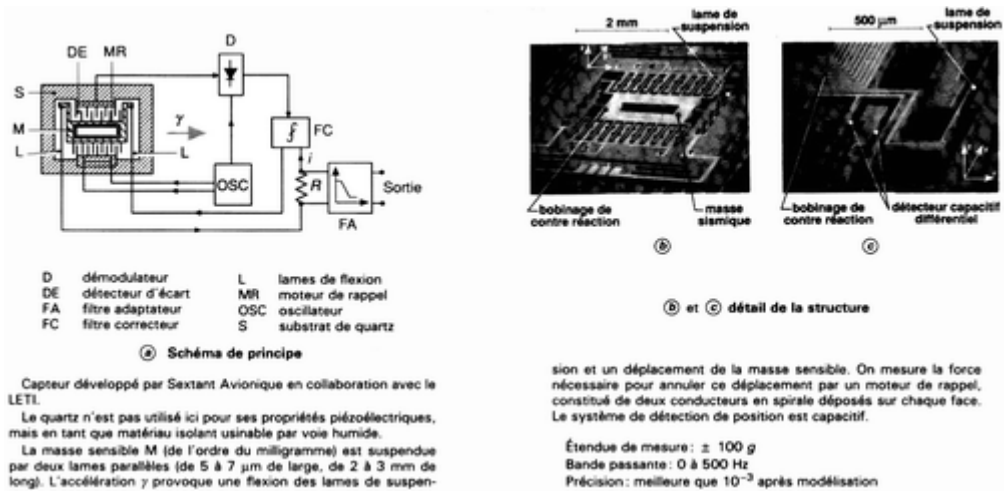
- bas coût (grâce aux procédés de fabrication en mode collectif), ce qui permet l'utilisation pour le secteur automobile (sécurité active et passive des véhicules) ;
- solidité, fiabilité ;
- petite taille permettant l'accès à des domaines particuliers (médecine, biologie).

Les précisions actuelles sont encore moyennes (entre  $10^{-2}$  et  $10^{-3}$  de la pleine échelle).

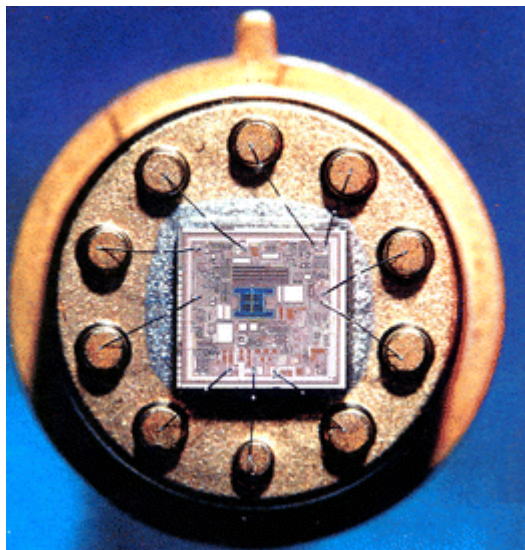
- **Constructeurs** : Analog Devices, CSEM (Centre Suisse d'Électronique et de Microtechnique), Delco (USA), ENDEVCO, ESIEE (École supérieure d'ingénieurs en électrotechnique et électronique), Honey-well, IC Sensors, SAGEM, Sextant Avionique, STC (UK), Vectavib.



**Figure 19** - Accéléromètre capacitif miniature en silicium (doc. CSEM)



**Figure 20** - Capteur micro-usiné sur quartz (version en boucle fermée) (doc. Sextant Avionique, LETI)



La détection est capacitive.

L'élément sensible et le conditionnement du signal sont intégrés sur la même puce. Le capteur a été développé pour les besoins de l'industrie automobile (détecteur de chocs).

Étendue de mesure :  $\pm 50$  g  
 Précision : 5 %

L'élément sensible mesure  $600 \times 625 \mu\text{m}$ ; avec tous ses circuits annexes d'alimentation, de mesure et de traitement informatique, l'accéléromètre complet tient sur une puce carrée de silicium de 3 mm de côté.

**Figure 21** - Accéléromètre micro-usiné Analog Devices

## Sommaire

---

Quelles sont les utilisations de l'accéléromètre?

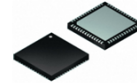
- ▶ L'accéléromètre : présentation et utilisations.
- ▶ L'accélération.
- ▶ Présentation de 2 différents types d'accéléromètre.
- ▶ Expérience.



▶ PTSI - TIPE 2010/2011

## L'accéléromètre : présentation et utilisations.

---



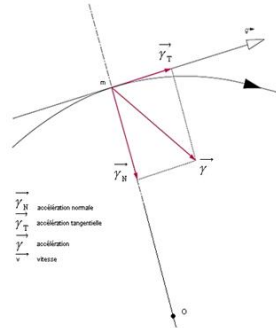
Présentation :

- ▶ ● ...**utilisation comme outil de mesure** notamment dans les derniers produits high-tech.
- ▶ ● ...**utilisation comme outil de mesure des accélérations** à bord de véhicules automobiles.
- ▶ ● ...**utilisation comme outil de navigation** ( domaine de l'aérospatial, aéronautique...)
- ▶ ...**utilisation comme outil de contrôle des accélérations** dans les essais de chocs ou de vibrations d'équipements / structures.
- ▶ ...**utilisation comme outil de contrôle mécaniques** d'ensembles industriels...
- ▶ ...**utilisation dans le domaine médical**
- ▶ ...**utilisation dans le futur...**



▶ PTSI - TIPE 2010/2011

# L'accélération.



$\vec{\gamma}_n$  accélération normale  
 $\vec{\gamma}_t$  accélération tangentielle  
 $\vec{\gamma}$  accélération  
 $\vec{v}$  vitesse

$$\vec{\gamma} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2\vec{OM}}{dt^2}$$

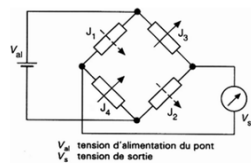
Composition des mouvements :

$$\vec{J}^{(R)}(M) = \vec{J}^{(R)}(M_S) + \vec{J}^{(S)}(M) + 2 \vec{\omega}_S^R \wedge \vec{v}^{(S)}(M)$$

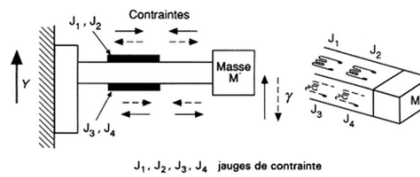
PTS1 - TIPE 2010/2011

# Accéléromètres

► Accéléromètre à jauge de contrainte.

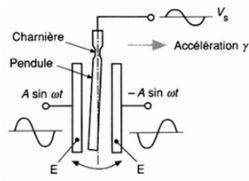


$V_{al}$  tension d'alimentation du pont  
 $V_s$  tension de sortie

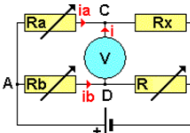


$J_1, J_2, J_3, J_4$  jauges de contrainte

Accéléromètre à détection capacitive.



$E$  électrodes fixes  
 $V_s$  tension de sortie  
 $A$  amplitude de l'excitation du pont capacitif



Lorsque le voltmètre V indique 0

$$\Rightarrow U_{CD} = 0 \text{ et } i = 0$$

$$\Rightarrow R_a \cdot i_a = R_b \cdot i_b \quad (1)$$

$$\Rightarrow R_x \cdot i_a = R \cdot i_b \quad (2)$$

en divisant (2) par (1):

$$\frac{R_x}{R_a} = \frac{R}{R_b} \Rightarrow R_x = \frac{R_a \cdot R}{R_b}$$

La sensibilité du pont croît avec la tension d'alimentation (UAB).

## Etude comparative

Caractéristiques	Détection	
	capacitive	Jauge contrainte
Impédance	haute	basse
Taille	grande	moyenne
Gamme de température	large (250 °C)	moyenne (100 °C)
Erreur de linéarité	grande	faible
Réponse en continu	oui	oui
Réponse en alternatif (Hz)	large (500)	moyenne (100)
Amortissement	possible	possible
Sensibilité	élevée	moyenne
Circuit électronique associé	oui	pas obligatoire
Coût (relatif)	élevé (2)	faible (1)

## Expérience.

- Utilisation d'une manette de Wii : acquisition des accélérations par ordinateur & traitement des données.



**Logiciel : GlovePIE**  
**Matériel : un pendule, une wiimote, une clef Bluetooth, pc portable avec Windows XP.**



```
output - Bloc-notes
Fichier Edition Format Affichage ?
61689.63:-2.61#-0.98*-11.76
61689.66:-2.61#-0.98*-11.76
61689.67:0.38#-1.35*-7.62
61689.70:0.00#-1.35*-7.99
61689.72:0.00#-1.69*-9.80
61689.75:0.00#-2.03*-10.89
61689.78:0.00#-2.03*-10.53
61689.80:-0.38#-1.69*-9.07
61689.83:0.00#-1.69*-9.44
61689.86:-0.38#-1.69*-10.16
61689.88:0.00#-1.69*-9.80
61689.91:0.00#-1.35*-8.35
61689.92:0.38#-1.69*-8.71
61689.95:0.00#-1.69*-9.80
```

*Montrer par exemple  
l'influence des frottements sur  
un pendule en comparant  
les résultats théoriques et  
logiciels.*

NOTES :

PLAN ORAL : - introduction –présentation / but du type – annonce du plan et problématique

.utilisations de l'accéléromètre :

- Iphone changer le mode d'affichage
- Airbags chocs brutaux
- Pacemaker : accéléromètre détecte tout changement de rythme du cœur afin d'adapter les impulsions envoyés au cœur en fonction des besoins physiques
- Dans le futur : intégrer l'accéléromètre aux stylos pour sécuriser les signatures

.accélérations : présentation des accélérations

.détailler deux accéléromètres : jauge contrainte et détection capacitive grace dossier

.étude comparative