

## DM4 : L'accéléromètre

L'objectif du DM est de vous familiariser avec les notions vues en cours en les appliquant. Le travail en groupe est fortement encouragé et vous pouvez rendre une copie par groupe de 2 ou 3.

### Document 1 : L'ACCÉLÉROMÈTRE

Un accéléromètre est un capteur qui, fixé à un mobile ou tout autre objet, permet de mesurer l'accélération linéaire de ce dernier. On parle encore d'accéléromètre même s'il s'agit en fait de 3 accéléromètres qui calculent les 3 accélérations linéaires selon 3 axes orthogonaux.

Bien que l'accélération linéaire soit définie en  $\text{m s}^{-2}$  (SI), la majorité des documentations sur ces capteurs expriment l'accélération en  $g$  (accélération causée par la gravitation terrestre, soit environ  $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$ ).

Les accéléromètres sont utilisés dans un grand nombre de produits grand public, entre autres :

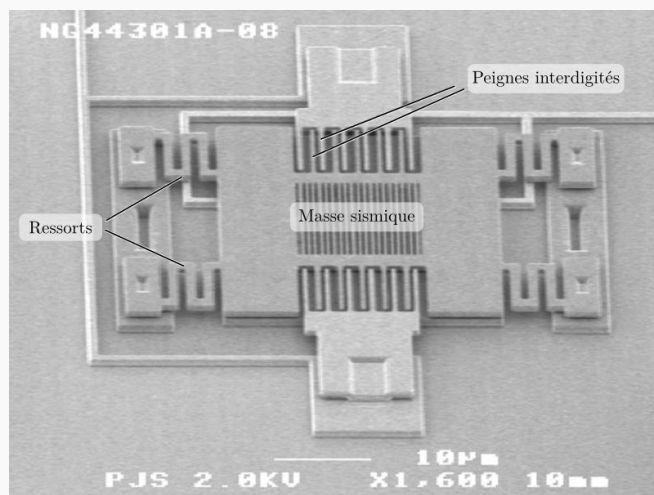
- Les montres de sport pour déterminer la vitesse et la distance de déplacement ;
- Les appareils photos et caméras pour la stabilisation de l'image, l'orientation de l'appareil ;
- Les tablettes, ordinateurs portables pour détecter l'orientation de l'écran ;
- Dans les ordinateurs portables, un accéléromètre détecte les chutes et arrête le disque-dur pour le protéger.

Source : Wikipédia

### Document 2 : RÉALISATION D'UN CAPTEUR MEMS (MICRO-ELECTRO-MECHANICAL-SYSTEM)

Concrètement, le capteur est réalisé à la surface d'une tranche de silicium (*wafer*, masse volumique :  $2.33 \text{ g/cm}^3$ ) à l'aide de techniques spécifiques, tels la photolithographie et le microusinage de couches minces.

Après réalisation, on observe par microscopie électronique que la surface du composant présente des micro-structures en silicium telles des micro-poutres, des microlamelles, etc. Les dimensions typiques des éléments de ces structures sont de 1 à 100  $\mu\text{m}$ .



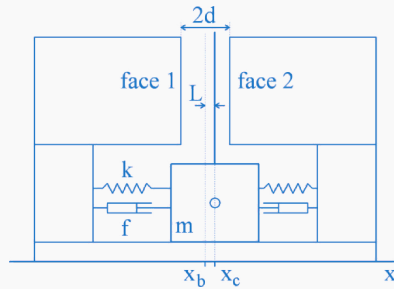
Ces photographies montrent la *masse sismique* (la partie centrale ajourée ou *beam*) dont on étudie le mouvement et qui subit globalement les effets de l'accélération à mesurer. Celle-ci est reliée *au bâti* par des micro-poutres d'ancrage (*anchor*) pour un système un axe ou des micro-ressorts positionnés dans les coins pour un système deux axes. Ces parties flexibles gouvernent le mouvement du mobile.

Le suivi du déplacement est assuré par un capteur capacitif organisé autour de séries de lamelles en regard, solidaires pour moitié du bâti et pour moitié de la masse mobile. De façon générale on qualifie d'IDT (pour InterDigital Transducer) cette structure particulière en forme de *peignes* digités interpénétrés (allusion aux doigts des mains). La multiplicité de ces lamelles améliore évidemment la sensibilité de la mesure.

Source : BUP n° 920

**Document 3 : ÉTUDE MÉCANIQUE DU FONCTIONNEMENT D'UN CAPTEUR**

Le capteur différentiel est modélisé par un simple mobile de masse  $m$  posé sur un support horizontal et pouvant se déplacer le long de l'axe des  $x$ . Le mobile est relié au support par des systèmes ressorts/amortisseurs décrivant le comportement mécanique des éléments du MEMS (raideur  $k$ , coefficient de frottement  $f$ ).



On note  $x_c$  la position du centre de masse du mobile en mouvement et  $x_b$  sa position au repos par rapport au support (c'est-à-dire en fait celle du support :  $x_b$  ne varie que si le support se déplace, c'est-à-dire si l'accéléromètre se déplace en bloc).

Ce mobile subit les effets de l'accélération  $a(t)$  du support : le rôle de ce système est de permettre la mesure de cette accélération  $a(t)$ .

L'analyse des forces donne l'équation de mouvement du centre de masse de la partie mobile sous l'action des forces qui lui sont appliquées (dans ce modèle, il n'y a pas de frottement entre la partie horizontale du support et le bas de la partie mobile).

En projetant la relation fondamentale de la dynamique sur l'axe  $x$  on obtient

$$\frac{d^2 L}{dt^2} + \frac{2f}{m} \frac{dL}{dt} + \frac{2kL}{m} = -a(t), \quad (1)$$

et l'analyse harmonique de la partie mécanique du capteur se fait sur l'équation complexe associée (transformation  $\frac{d}{dt} \rightarrow j\omega$ ). On obtient :

$$\frac{\underline{L}}{\underline{a}} = \frac{-\frac{1}{\omega_0^2}}{1 + 2j\mu \frac{\omega}{\omega_0} + \left(j \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \quad (2)$$

avec la pulsation caractéristique  $\omega_0^2 = \frac{2k}{m}$  et le paramètre d'amortissement  $\mu = \sqrt{\frac{f^2}{2km}}$ .

Les données constructeur de l'accéléromètre ADXL103 fabriqué par *Analog Devices* indiquent que la fréquence de résonance mécanique de l'accéléromètre est de l'ordre de 5,5 kHz

Source : BUP n° 920

## Questions :

1. Expliquer comment un accéléromètre est utilisé pour détecter l'orientation d'une tablette ou d'un appareil photo.
2. Expliquer qualitativement (et brièvement) comment est faite la détection de l'accélération dans un accéléromètre de type MEMS.
3. (Question facultative difficile) Démontrer l'équation (1).
4. Expliquer en quoi le capteur présenté se comporte comme un filtre. De quel type de filtre s'agit-il ?
5. Tracer la courbe représentant le module du rapport entre le déplacement  $L$  et l'accélération  $a$  en fonction de  $\omega$ , pour  $\mu = 0.5$ ,  $\mu = 1$  et  $\mu = 5$ .
6. Montrer que lorsque  $\omega$  est suffisamment faible (préciser ce que cela signifie), la constante de proportionnalité entre l'élongation et l'accélération est indépendante de  $\omega$ . Que vaut alors la constante de proportionnalité ? En observant les courbes tracées à la question précédente, quelle doit être la valeur de  $\mu$  pour maximiser la gamme de fréquences pour laquelle la constante de proportionnalité est constante.
7. En estimant un ordre de grandeur de la masse sismique de silicium, qui bouge dans un accéléromètre, donner une estimation de la constante de raideur  $k$  des ressorts qui la relie au bâti.
8. Le capteur fournit un signal électrique proportionnel à l'élongation  $L$ . Dans quelle gamme de fréquence doit-on se trouver pour s'assurer que le signal fourni représente correctement l'accélération ? Comment peut-on faire pour s'assurer de ne conserver que les signaux électriques dans cette gamme de fréquence ?