

## Accéléromètre : un exemple de filtrage

La notion de filtrage concerne tout type de système : électrique, mécanique...

Les sismomètres, les amortisseurs, les accéléromètres sont des filtres mécaniques.

Le récent essor des appareils grand public utilisant des accéléromètres intégrés (manettes de jeu video, smartphone...) nous amènent à examiner le cas d'un composant fabriqué par la firme Analog Devices.

Il s'agit d'une puce qui transforme une accélération mécanique en un signal électrique, qui pourra ensuite être exploité électroniquement par l'appareil dans lequel elle est intégrée.

### A. Etude mécanique sommaire d'un accéléromètre.

#### Introduction

**MEMS**<sup>1</sup> (microelectromechanical systems) technology builds on the core fabrication infrastructure developed for silicon integrated circuits. Micromechanical structures are created by etching defined patterns on a silicon substrate to form sensor elements or mechanical actuators that can move fractions of a micron. Pressure sensors, one of the first high volume MEMS applications, now monitor pressure in hundreds of millions of engine manifolds and tires; and MEMS accelerometers have been used for over 15 years for airbag deployment, rollover detection, and automotive alarm systems.

MEMS accelerometers<sup>2</sup> are also used for motion sensing in consumer applications, such as video games and cell phones. MEMS micromirror optical actuators are used in overhead projectors, HDTVs, and digital theater presentations. In recent years, MEMS microphones<sup>3</sup> have begun to proliferate the broad consumer market, including cell phones, Bluetooth headsets, personal computers, and digital cameras.

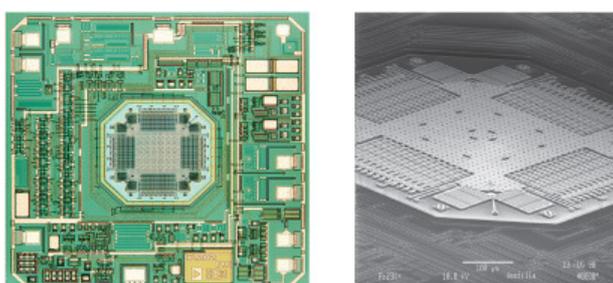
#### MEMS Accelerometer Technology

The core element of a typical MEMS accelerometer is a moving beam structure composed of two sets of fingers: one set is fixed to a solid ground plane on a substrate; the other set is attached to a known mass mounted on springs that can move in response to an applied acceleration. This applied acceleration (Figure 1) changes the capacitance between the fixed and moving beam fingers.<sup>4</sup>



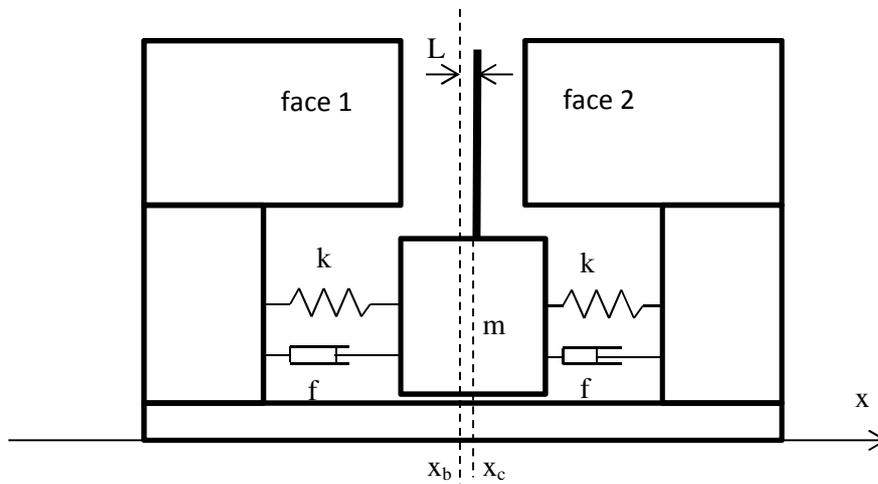
**Figure 1. MEMS accelerometer structure. Figure 2. ADXL50 MEMS accelerometer structure.**

The dimensions of these MEMS structures, on the order of microns (Figure 2), require very high precision silicon photolithography and etching process technologies. MEMS structures are typically formed from single-crystal silicon, or from polysilicon that is deposited at very high temperatures on the surface of a single-crystal silicon wafer. Structures with very different mechanical characteristics can be created using this flexible technology. One mechanical parameter that can be controlled and varied is spring stiffness. The mass of the sense element and the damping of the structure can also be modified by design. Sensors can be produced to measure fractions of one  $g$  or hundreds of  $g$ 's with bandwidths as high as 20 kHz.



**Figure 3. ADXL202  $\pm 2 g$  accelerometer.**

Un accéléromètre peut être modélisé par un simple mobile de masse  $m$ , posé sur un support horizontal et pouvant se déplacer le long d'un axe (Ox). La masse mobile est reliée au support par des systèmes ressorts/amortisseurs, chacun étant doté d'une raideur  $k$  et d'un coefficient d'amortissement linéaire  $f$  amenant une force d'amortissement proportionnelle à la vitesse relative du mobile et du support.



On note  $x_c$  la position du centre de masse du mobile et  $x_b$  la position du support, susceptibles de varier lorsque l'accéléromètre subit un déplacement. Au repos  $x_c = x_b$ .

On note  $a(t)$ , l'accélération subie par le support. Le rôle de l'accéléromètre est de permettre la mesure de cette accélération.

1. En exploitant le document précédent, expliquer qualitativement comment cette mesure est possible et comment l'accélération enregistrée peut être traduite en une grandeur électrique.
2. Après avoir explicité chacune des forces agissant selon l'axe (Ox) sur la masse mobile dans le modèle proposé, établir l'équation différentielle du mouvement.
3. La grandeur mesurable est reliée à l'élongation  $L = x_c - x_b$ . En déduire l'équation différentielle sur  $L$ , la reliant à l'accélération  $a(t)$  :

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

4. On se place en régime sinusoïdal forcé, de pulsation  $\omega$ . On introduit les grandeurs instantanées complexes  $\underline{L}$  et  $\underline{a}$  relatives à  $L(t)$  et  $a(t)$ . Exprimer le rapport  $\underline{L}/\underline{a}$  sous la forme d'un transfert complexe d'expression :

$$H(j\omega) = \frac{-A}{1 + j \frac{\omega}{Q\omega_0} - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}$$

et identifier les quantités  $A$ ,  $\omega_0$  et  $Q$  en fonction des paramètres  $m$ ,  $k$  et  $f$ .

5. Proposer une allure du graphe du module  $H(\omega)$  de la fonction  $H(j\omega)$  en fonction de la pulsation. Quelle est la nature de ce filtrage mécanique ? L'amortissement est relativement faible. Quelle conséquence cela aura-t-il sur le comportement du système ?
6. Dans quelles conditions de fréquences aura-t-on une grandeur  $L(t)$  proportionnelle à l'accélération  $a(t)$  ? La masse  $m$  étant de l'ordre du microgramme, quel serait l'ordre de grandeur de  $k$  pour avoir une bande passante de 20 kHz ?

## B. Implantation du composant.

Le modèle présenté est l'accéléromètre ADXL330. Les deux premières lettres de cette dénomination désignent le fabricant. L'ensemble des paramètres de fonctionnement est décrit dans un document public accessible par internet, nommé « datasheet » du composant (voir document joint, extraits).

Consulter ce document, puis répondre aux questions suivantes :

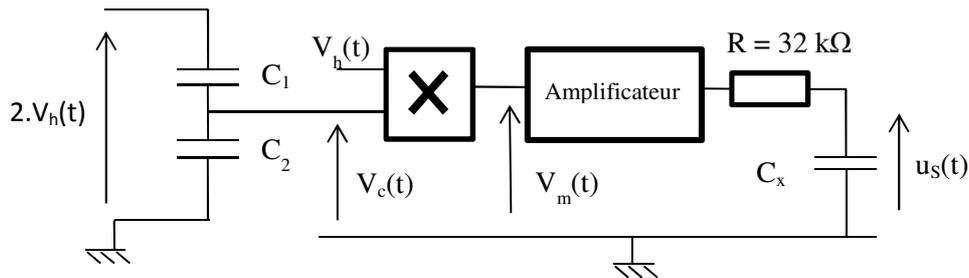
1. Le composant ADXL330 permet des mesures de l'accélération selon trois axes. Sont-ils équivalents ? Préciser.
2. Le schéma-bloc proposé sur la notice du constructeur mentionne un amplificateur alternatif en sortie de capteur, puis un démodulateur, et enfin des amplificateurs pour chacune des voies. Le schéma ci-dessous correspond au traitement pour une voie.

Le principe (simplifié, certains aspects sont occultés ici) est d'utiliser la déformation d'un système capacitif formé d'un « peigne » relié à une masse d'inertie (le tout est minuscule !), ici représenté par deux condensateurs.

Les variations des capacités  $C_1$  et  $C_2$  sont opposées et proportionnelles à l'accélération  $a(t)$  subie par le capteur.

Ces condensateurs sont montés en pont capacitif. Leur valeur de capacité répond respectivement à :

$C_1 = C_0 \cdot (1 + \alpha \cdot a)$  et  $C_2 = C_0 \cdot (1 - \alpha \cdot a)$ , où  $a$  est la valeur d'accélération mesurée et  $\alpha$  un facteur invariant.



La tension alimentant le pont capacitif est obtenue à partir d'un composant délivrant un signal d'horloge  $V_h(t)$  de fréquence  $f_h$  de l'ordre de quelques centaines de Hertz. Le signal d'horloge est constitué d'impulsions périodiques, sous forme d'un créneau entre les valeurs de tension 0 et 5 V.

- 2.1 Expliciter la tension captée  $V_c(t)$  en fonction des capacités  $C_1$  et  $C_2$  et de la tension  $V_h(t)$ . En déduire que la tension  $V_c(t)$  peut s'écrire comme une tension créneau de fréquence  $f_h$  dont l'amplitude sera modulée en fonction de la valeur de l'accélération subie par le capteur.
- 2.2 L'accélération instantanée  $a(t)$  est supposée avoir des variations très lentes par comparaison à la fréquence d'horloge  $f_h$ . Dans ces conditions, on montre que la tension  $V_m(t)$  obtenue en sortie du composant multiplieur  $V_m(t) = 0,1 \cdot V_h(t) \cdot V_c(t)$  comporte pour composantes fréquentielles :
  - un terme constant,
  - des termes fréquentiels traduisant les variations temporelles de l'accélération,
  - des termes de fréquence élevée, de l'ordre de la fréquence d'horloge.
 Quel est le rôle de la structure  $(R, C_x)$  placée en sortie du dispositif ? La valeur de capacité  $C_x$  présente par construction en sortie du dispositif est de 3,0 nF pour la voie x et la voie y. Quels seront les termes fréquentiels obtenus dans la tension de sortie  $u_s(t)$  (Justifier) ?
- 2.3 La notice mentionne une fréquence de résonance du capteur située à 5,5 kHz (voir partie A). Cela aura-t-il des conséquences sur la mesure d'accélération ?
3. La notice donne des informations concernant les phénomènes de bruits (noise) électroniques (phénomènes de parasitages liés à de faibles fluctuations de tensions, aléatoires et d'origine microscopique), qui vont limiter la précision des mesures d'accélération.
 

Un utilisateur veut employer le composant en l'intégrant dans une manette de jeu vidéo. Il se conforme aux prescriptions du constructeur en ajoutant en sortie de chaque voie du capteur des condensateurs de capacité identiques  $C'_x = C'_y = C'_z = 0,10 \mu\text{F}$ .

  - 3.1 Quelle sera alors la bande passante du capteur ? Est-elle adaptée à l'usage envisagé ?
  - 3.2 Quelle est alors la précision susceptible d'être atteinte pour les mesures d'accélération ? On calculera numériquement la valeur efficace des fluctuations apparaissant sur les mesures, dans les conditions d'emploi choisies.