

# Cours

## 1 Définir les termes suivants :

- Mesurande
- Corps d'épreuve
- Mesurande primaire
- Mesurande secondaire
- Capteur composite
- Erreurs systématiques
- Erreurs aléatoires
- Que signifie le terme "juste" pour un capteur ?
- Que signifie le terme "fidèle" pour un capteur ?
- Que signifie le terme "précis" pour un capteur ?

# Problème

## 2 Introduction

L'objet du problème est de proposer une étude élémentaire, mais néanmoins détaillée du fonctionnement d'un accéléromètre MEMS (pour Micro-Electro-Mechanical-System) du type de ceux utilisés pour le déclenchement d'airbag, tant au point de vue du capteur proprement dit que du conditionnement du signal de mesure.

L'étude porte sur les accéléromètres de la série ADXL, dont le constructeur est Analog Devices. Le principe de fonctionnement est peu éloigné de la présentation qui est faite dans le présent document.

Pour mémoire, Analog Devices est le principal fournisseur de capteurs inertiels en technologie MEMS pour l'industrie automobile, soit 500 millions de pièces en quinze ans.

## 3 Accéléromètre MEMS de la série ADXL

### 3.1 Miniaturisation

Les premiers accéléromètres (1980) occupaient une carte d'environ 50 cm<sup>2</sup>. Dès 1995, la partie active d'un ADXL50 (accéléromètre originel pour les applications d'airbag) était réduite à un carré de 16 mm<sup>2</sup>. Le composant sur lequel est basée cette étude date de 2006 et occupe seulement 3 mm<sup>2</sup>, comme les composants récents.



FIGURE 1 – Capteur de la série ADXL

On dispose maintenant de capteur capables de mesurer une, deux, trois composantes de l'accélération linéaire, mais aussi une, deux, trois composantes de l'accélération angulaire.

Suivant la tendance actuelle, l'autre série ADIS exploite des systèmes tout numériques programmables plus sophistiqués, incluant du traitement et du contrôle, de l'interfaçage, des auto-tests, la gestion de la consommation,ect.. En suivant la terminologie technologique, on peut considérer ces capteurs comme "intelligents".

Dans la série ADXL, le capteur MEMS proprement dit et son électronique de conditionnement sont intégrés dans le même composant selon la pratique actuelle.

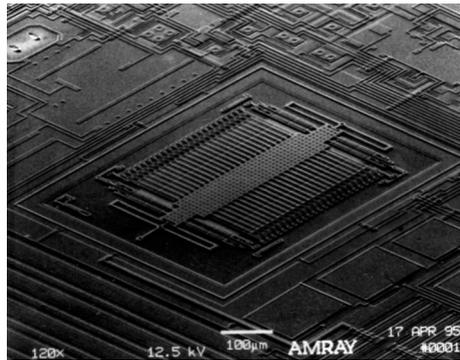


FIGURE 2 – Vue générale du capteur MEMS d'un accéléromètre ADXL50 High-g un axe

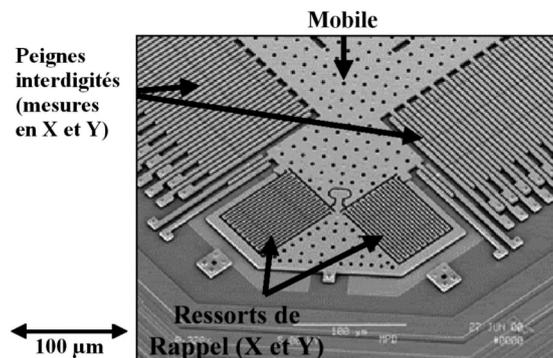


FIGURE 3 – Détails d'un accéléromètre type ADXL202 low-g deux axes

subsectionRéalisation du capteur Concrètement, le capteur est réalisé à la surface d'une tranche de silicium ("wafer") à l'aide de techniques spécifiques, tels que la photolithographie et le micro-usinage des couches minces.

Après réalisation, on observe par microscopie électronique que la surface du composant présente des micro-poutres, des micro-lamelles, ect. 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 partis 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 IntergerDigital Transducer) cette structure particulière en

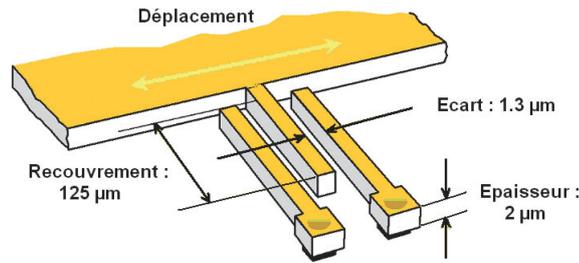


FIGURE 4 – Description des lamelles associées à un doigt d'un capteur actuel ("single finger set"). Il y a deux séries de trente motifs de ce type pour ADXL78, soit une capacité totale de 64 pF pour une masse mobile de  $0,7 \mu\text{g}$ .

forme de "peignes" digités interpénétrés (allusion aux doigts de la main). La multiplicité de ces lamelles améliore évidemment la sensibilité de la mesure.

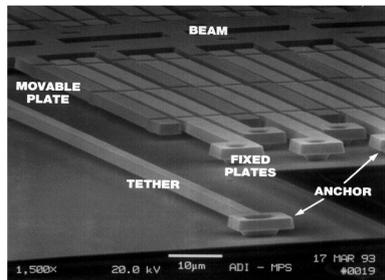


FIGURE 5 – Détails du capteur MEMS d'un ADXL50 originel : le mobile (« beam »), les micro-barres de flexion faisant ressort (« anchor ») et les séries de trois lamelles fixes mobiles (« plate »).

Comme le montrera la suite de l'étude, la nature capacitive du suivi du déplacement ne permet pas pour autant d'assimiler cet accéléromètre à un "simple" condensateur dont on pourrait étudier la réponse au sein d'un basique circuit "RC" pour obtenir l'accélération. C'est un capteur différentiel à paires de condensateurs. Le conditionnement du signal de mesure devra être plus élaboré.

## 4 mécanique du fonctionnement d'un capteur un axe

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

Notations :

- $x_c$  la position du centre de masse du mobile en mouvement.
- $x_b$  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.

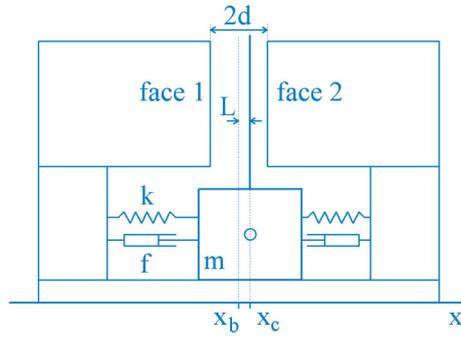


FIGURE 6 – Modélisation pour le mouvement sur l’axe  $x$  d’un élément mobile

## 4.1 Équation du mouvement de la masse $m$

En appliquant le principe fondamental de la dynamique par rapport au bâti à la masse  $m$ , établir l’équation du mouvement.

Notations :

- $x_c$  : position du centre de masse du mobile en mouvement.
- $x_b$  : position du centre de masse au repos.
- $m$  : masse sismique.
- $k$  : constante de raideur des ressorts.
- $f$  : coefficient de frottement des amortisseurs.

## 4.2 Expression de l’accélération $a(t)$ en fonction du déplacement $L$

Notations :

- $L = x_c - x_b$
- $a(t) = \frac{d^2 x_b}{dt^2}$

Établir l’équation différentielle qui régit l’allongement  $L$  en fonction de  $a(t)$

## 4.3 Transmittance du système

Notations :

- $a(p)$  grandeur de Laplace associée à  $a(t)$ .
- $L(p)$  grandeur de Laplace associée à  $L(t)$ .

### 4.3.1 Transmittance

Établir la transmittance du système  $T(p) = \frac{L(p)}{a(p)} = \frac{T_o}{1 + 2\frac{\xi}{\omega_o}p + \frac{p^2}{\omega_o^2}}$

### 4.3.2 Identification

Établir l’expression de  $T_o$ ,  $\xi$  et  $\omega_o$  en fonction de  $f, k, m$ .

4.3.3 En déduire que pour  $\omega \ll \omega_o$  :

$$L \simeq -\frac{m}{2k}a(t)$$

## 5 Étude du conditionnement électronique du capteur

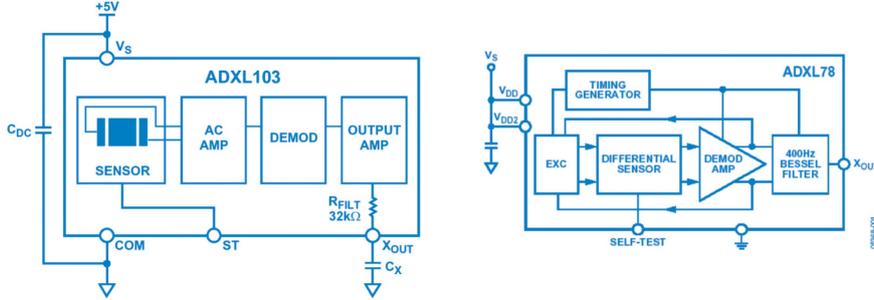


FIGURE 7 – Schéma-bloc des accéléromètres ADXL103 et ADXL78

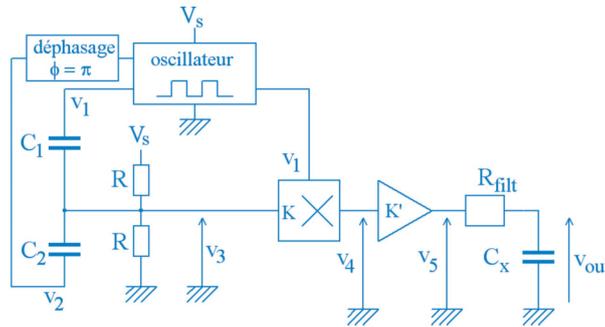


FIGURE 8 – Schéma d'interprétation détaillé selon le fichier de données ADXL103

Le composant est alimenté de façon asymétrique entre 0 V et +5 V : les tensions intervenant dans le fonctionnement du circuit devront être positives.

### 5.1 Transduction du déplacement par un pont capacitif en modulation

Comme le montre le schéma de modélisation initial, le mobile est solidaire d'une lame pouvant se déplacer entre les faces 1 et 2.

Les paires de faces en regard définissent deux condensateurs  $C_1$  et  $C_2$  de capacités dépendant de  $L$  (en réalité, les photographies en microscopie électronique montrent qu'il s'agit de séries de micro-lamelles).

L'oscillateur génère un signal carré d'horloge à une fréquence  $f_h$ , représentés par la tension  $v_1(t)$ . D'origine numérique, il est positif. De niveau haut  $V_s$  et de niveau bas  $0V$ , il a une moyenne égale à  $\frac{V_s}{2}$ . La tension  $v_2$  est obtenue par inversion logique, ce qui revient à décaler  $v_1$  d'une demi-période.

On suppose de plus que seuls les effets du premier harmonique seront effectifs, de sorte que :

$$v_1 = \frac{V_s}{2} + V_1 \sin(\omega t) \text{ et } v_2 = \frac{V_s}{2} - V_1 \sin(\omega t)$$

On verra en effet plus loin que la dernière étape est un filtrage passe-bas qui élimine toutes les composantes de pulsations supérieures ou égale à  $\omega$ . Les autres harmoniques ne donneraient donc que des termes correctifs qui seraient éliminés dans le calcul.

Le pont formé par les deux capacités est ainsi alimenté par deux tensions dont les parties variables sont en opposition de phase.

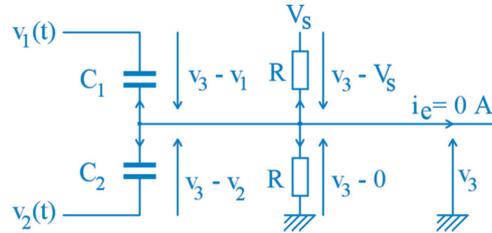


FIGURE 9 – Conditionnement en pont du capteur différentiel de position

On suppose que le courant d'entrée du multiplieur d'amplification  $K$  est négligeable du fait d'une forte impédance d'entrée, soit  $i_e = 0A$ .

Les deux résistances  $R$  forment un pont de polarisation et ont pour objet d'établir une tension de mode commun  $\frac{V_s}{2}$  nécessaire par l'emploi d'une alimentation asymétrique.

**5.1.1** Montrer que  $v_3(t)$  vérifie la relation  $(C_1 + C_2)\frac{dv_3}{dt} + \frac{2}{R}v_3 = C_1\frac{dv_1}{dt} + C_2\frac{dv_2}{dt} + \frac{v_3}{R}$

**5.1.2** En déduire  $\frac{dv_3}{dt} + \frac{v_3}{\tau} = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2}\omega V_1 \cos(\omega t) + \frac{V_s}{2\tau}$

Donner l'expression de  $\tau$  en fonction des éléments du montage.

## 5.2 Relation entre les capacités et le déplacement L

Au vu de la photographie les lamelles, on suppose que les condensateurs  $C_1$  et  $C_2$  peuvent être assimilés à des condensateurs plans.

On rappelle l'expression de la capacité d'un condensateur :  $C = \varepsilon \frac{S}{e}$ .

- $S$  : surface des armatures du condensateur.
- $e$  : distance entre les armatures.
- $\varepsilon$  : permittivité du milieu.

Donner l'expression des capacités  $C_1$  et  $C_2$  en fonction de  $\varepsilon$ ,  $d$  et  $L$ .

## 5.3 Conditionnement du pont capacitif

Pour la suite de l'étude du conditionnement, on peut remarquer qu'extraire le signal par une technique de redressement perdrait l'information sur le signe de  $L$ , donc celui de l'accélération. On utilise donc une solution plus fine qui préserve l'information de signe.

La démodulation synchrone du signal issu du pont consiste en une multiplication par le signal modulant le pont capacitif, suivie d'un filtrage passe-bas adéquat.

**5.3.1 Donner l'expression de  $v_4(t)$  en sortie du multiplieur**

**5.3.2 Donner l'expression de  $v_5(t)$**

Le signal de sortie  $v_{out}(t)$  est filtré par le filtre passe-bas  $R_{filtre}, C_x$ . Il correspond à la valeur moyenne de  $v_5(t)$ .

En déduire  $v_{out} = KK' \left(\frac{V_S}{2}\right)^2 + KK' \frac{m}{4kd} V_1^2 a(t)$

**5.3.3 En déduire la sensibilité du capteur**