

Instrumentation

Joseph Moerschell, Marc Nicollrat

7 Capteur d'accélération

- Principe
- Mise en équations
- Comportement dynamique
- Principes de mesure
- Variantes de réalisation

7.1 Principe du capteur d'accélération

- Masse suspendue avec un ressort et un amortisseur

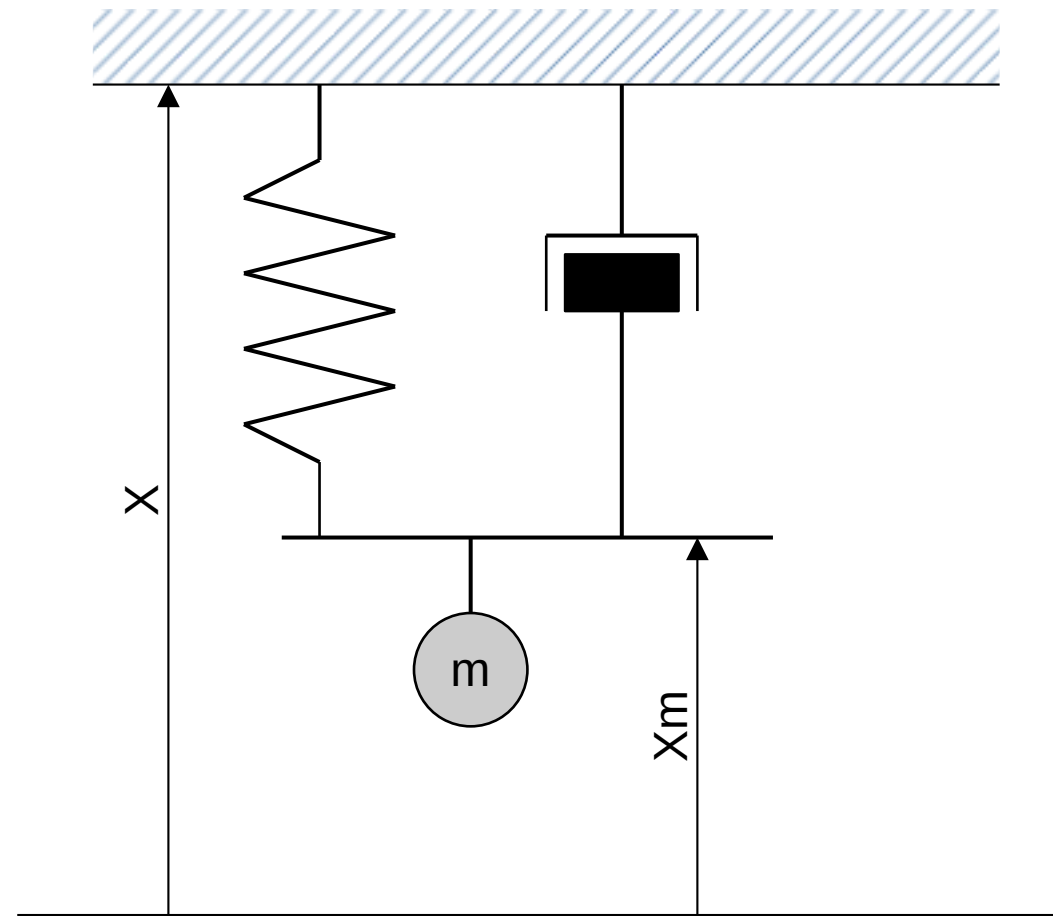


Figure 1: Principe du capteur d'accélération

Le capteur mesure la position de la masse par rapport au châssis ($x - x_m$). Cette mesure se fait de plusieurs façons : capteur piézo, capteur capacitif, capteur inductif...



Accéléromètre piézo-résistif

7.2 Réalisation

Les composants d'un capteur d'accélération sont

- Une masse
- Un ressort, qui peut être une partie de la structure, une lame,..
- Un système d'amortissement. L'amortissement est en général causé par le gaz qui entoure la masse.
- Une mesure de la position de la masse. Il y a plusieurs possibilités pour mesurer cette position.

7.3 Equations des capteurs d'accélération

Lorsqu'on accélère le châssis, le ressort et l'amortisseur transmettent une force à la masse.

Sur la base de la [Figure 1](#), les forces s'expriment ainsi :

$$F_{spring} = K_f \cdot (x - x_m), F_{damper} = c \cdot (v - v_m)[N] \quad (1)$$

En appliquant la loi de Newton sur la masse suspendue, on obtient (en posant $\Delta x = x - x_m$) :

$$\begin{aligned} m \cdot a_m &= F_{spring} + F_{damper} \\ &= K_f \cdot \Delta x + c \cdot \Delta \dot{x} \end{aligned} \quad (2)$$

Le but est d'obtenir l'accélération du châssis, soit la grandeur \ddot{x} . A partir de l'expression de Δx et des dérivées premières et secondes, on peut écrire [Equation 2](#) sous cette forme ($a_m = \ddot{x}_m$) :

$$\ddot{x} = \Delta \ddot{x} + \ddot{x}_m = \Delta \ddot{x} + \frac{K_f}{m} \Delta x + \frac{c}{m} \Delta \dot{x} \quad (3)$$

7.4 Equations suite...

L'Equation 3 peut s'écrire sous une forme canonique :

$$\Delta\ddot{x} + 2\delta_0\omega_0\Delta\dot{x} + \omega_0^2\Delta x = a \quad (4)$$

Où on a défini 2 paramètres importants de la dynamique :

- la pulsation propre
- et l'amortissement

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

$$\delta_0 = \frac{1}{2\omega_0} \frac{c}{m} = \frac{\omega_0 c}{2k_f}$$

La pulsation propre dépend de la force du ressort et de la masse. L'amortisseur permet de contrôler l'amortissement pour éviter des *oscillations*.

7.5 Régime transitoire et régime établi

Lorsqu'une accélération est appliquée au capteur, il mesure cette variation selon l'équation dynamique [Equation 4](#). Après un certain temps, un régime stationnaire s'établit. On a alors $\Delta\ddot{x} = 0$, $\Delta\dot{x} = 0$.

La relation devient :

$$a = \frac{k_f}{m} \Delta x$$

Un exemple de transitoire est donné sur la [Figure 2](#).

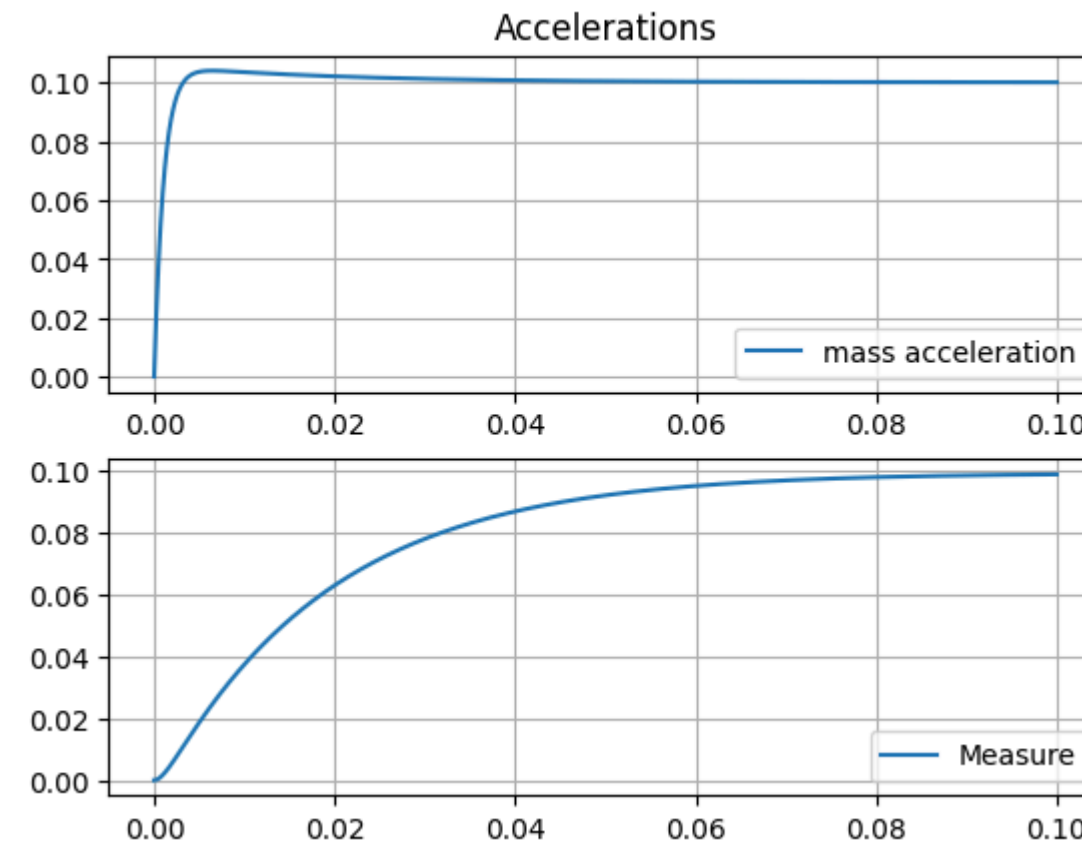


Figure 2: Transitoires observés lors de l'apparition d'une accélération constante de $a = 0.1[m/s^2]$

⚠ Important

Le capteur donne une mesure représentative de l'accélération dans la mesure où la vitesse de variation de l'accélération est faible par rapport à la fréquence propre de la masse et du ressort.

7.6 Caractéristique du capteur

Le capteur d'accélération est caractérisé par sa réponse *impulsionnelle* ou *fréquentielle*. Cette dernière est la plus utilisée.

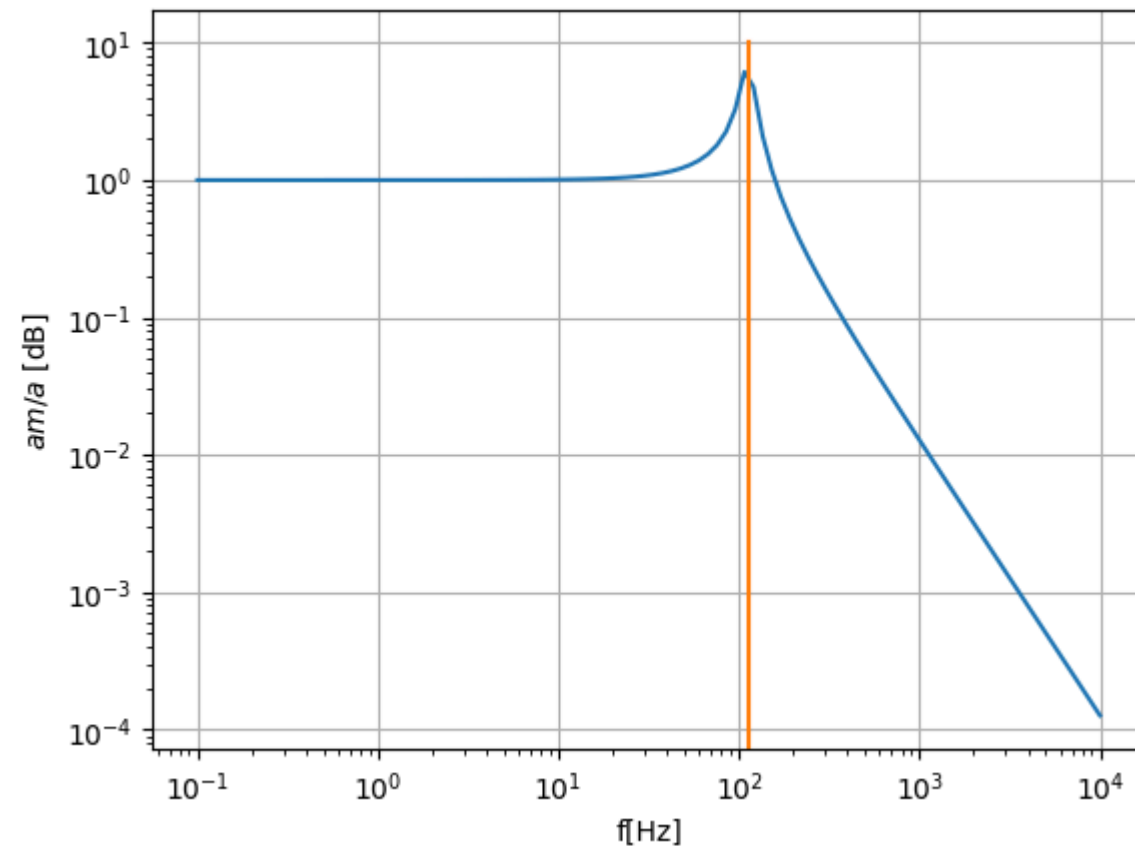


Figure 3: Diagramme de Bode de l'accéléromètre avec une résonance indésirable.

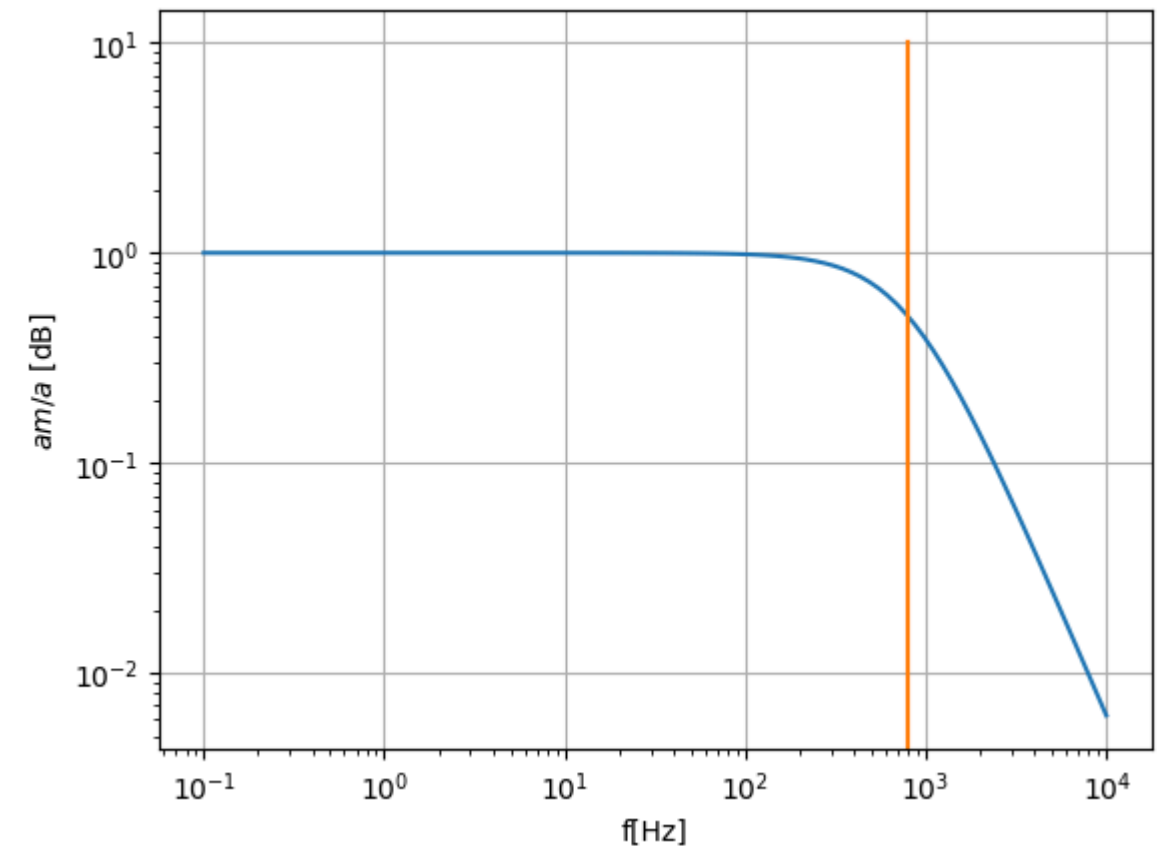


Figure 4: Diagramme de Bode de l'accéléromètre avec un bon amortissement.

💡 Testez

Le jupyter notebook `ex_capteur-acceleration_sol.ipynb` contient une simulation du capteur. Il est possible de changer les paramètres pour apprécier leur influence.

7.7 Sensibilité du capteur

La conception est un compromis précision-fréquence. Plus l'accélération qu'on veut mesurer est faible, plus la masse doit être grande.

Pour qu'un accéléromètre mesure des fréquences élevées, il doit avoir une petite masse. Ceci limite la bande passante.

IEPE Triaxial Accelerometer – Miniature Ceramic Shear 50 ... 2 000 g, Type 8763B...



Technical data

Type	Unit	8763B050...	8763B100...	8763B250...	8763B500...	8763B1K0...	8763B2K0...
Acceleration range	g	±50	±100	±250	±500	±1 000	±2 000
Threshold (1 Hz ... 10 kHz), typ.	g _{rms}	.00022	.00025	.00095	.0012	.0016	.0022
Sensitivity, at 100 Hz, 10 g _{rms}	mV/g	100 ±15%	50 ±15%	20 ±15%	10 ±15%	5 ±15%	2.5 ±15%
Resonant frequency, typ.	kHz	40		75			
Frequency response, ±5% ±10%	Hz	0.5 ... 7 000 0.3 ... 10 000		1 ... 10 000 0.7 ... 15 000			
Amplitude linearity	%FSO	±1					
Transverse sensitivity, typ. (max.)	%	2.5 (5.0)					

Exemple de spécification de Kistler

Note

Pour mesurer de petites accélérations, le capteur doit avoir une masse plus grande, donc sa fréquence de résonance diminue.

7.8 Principes de mesure de l'accélération

Le principe de fonctionnement est le même pour tous les capteurs, basé sur une masse suspendue. Il y a des variations selon la façon de mesurer le déplacement de la masse.

- Capteurs piézo-électriques

Ce type d'accéléromètres est constitué d'une masse supportée par un élément piézo-électrique. Ce dernier permet de mesurer la force exercée par la masse. Il délivre une charge électrique proportionnelle à la force d'inertie de cette masse, donc à l'accélération. L'élément piézo a une élasticité propre qui doit être prise en compte pour calculer la *fréquence propre*.

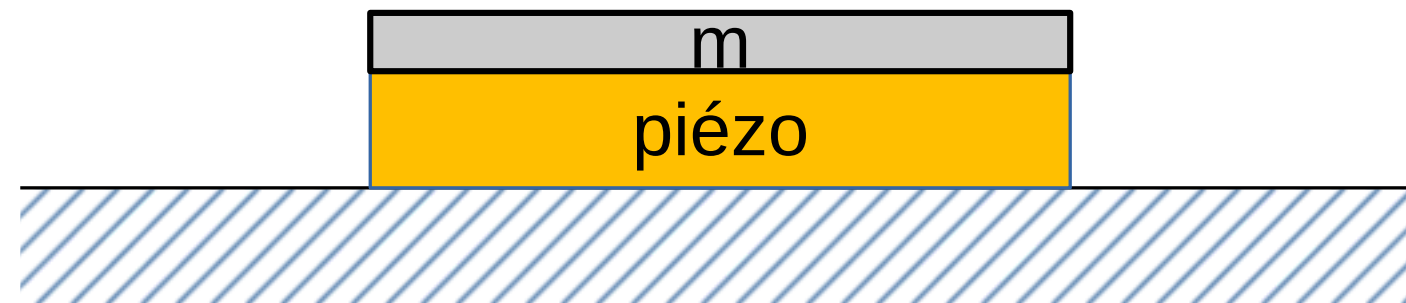


Figure 5: Principe de l'accéléromètre piezo-électrique

7.9 Modèle du capteur piézo-électrique

Le capteur piézo-électrique ne fonctionne pas en statique, il ne peut mesurer que des vibrations. Lorsqu'on applique une force, il libère une charge selon l'équation suivante:

$$Q = \beta \cdot F \quad [C] \quad (5)$$

Avec Q la charge libérée en *Coulombs* lorsqu'une force F est appliquée, β est un coefficient de géométrie. Un courant est généré lorsque la force varie selon l'équation [Equation 6](#).

$$I = \frac{dQ}{dt} = \beta \frac{dF}{dt} \quad (6)$$

Si F est une *vibration* de la forme $F = \hat{F}_0 \sin(\omega t)$, on a donc

$$I = \beta \cdot \hat{F}_0 \cdot \omega \cos(\omega t) = \hat{I}_0 \cos(\omega t)$$

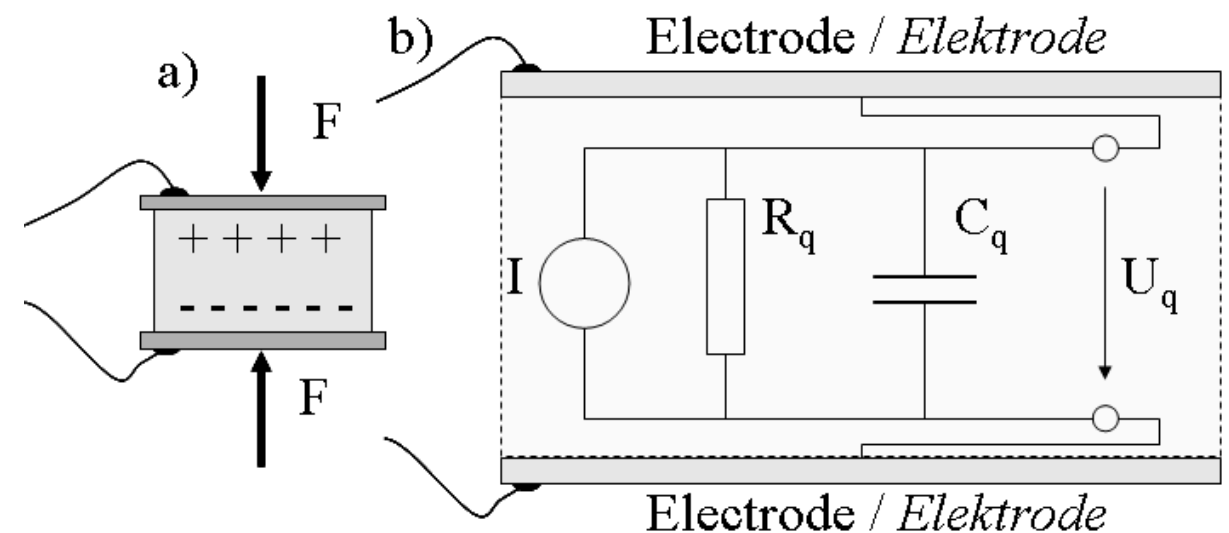


Figure 6: Modèle

Selon le schéma de la [Figure 6](#), on peut calculer la tension qui apparaît lorsqu'on applique une force F à partir de la relation entre tension et charge du condensateur :

$$Q = C \cdot U \Rightarrow U = \frac{\beta \cdot F}{C} \quad (7)$$

7.10 Exemple d'accéléromètre Piézo

La Figure 7 montre un exemple d'accéléromètre avec mesure piézo-électrique.

- Exemple avec Kistler 8205B

Uniaxial accelerometer

Type 8205B

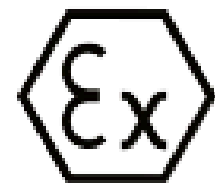
High temperature accelerometer 260°C

Accelerometer Type 8205B... is designed for permanent vibration monitoring in harsh and high temperature environments.

- Temperature range $-55 \dots 260 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Sensitivity 20, 50 and 100 pC/g
- Internally case isolated; differential output
- Frequency response up to 10 kHz ($\pm 10 \%$)
- Hermetically welded construction
- Connector and integrated cable versions
- ARINC triangular fixation
- Certified for use in potentially explosive environment



IECEx



CE

RoHS

A7

Figure 7: Extrait du datasheet

- La sensibilité est donnée en pC/g (pico-Coulomb par g).
- Le capteur est prévu pour une connection à un *amplificateur de charge*.

7.11 Amplificateur de charge

L'amplificateur de charge permet de mettre en forme le signal sous une forme plus commune :

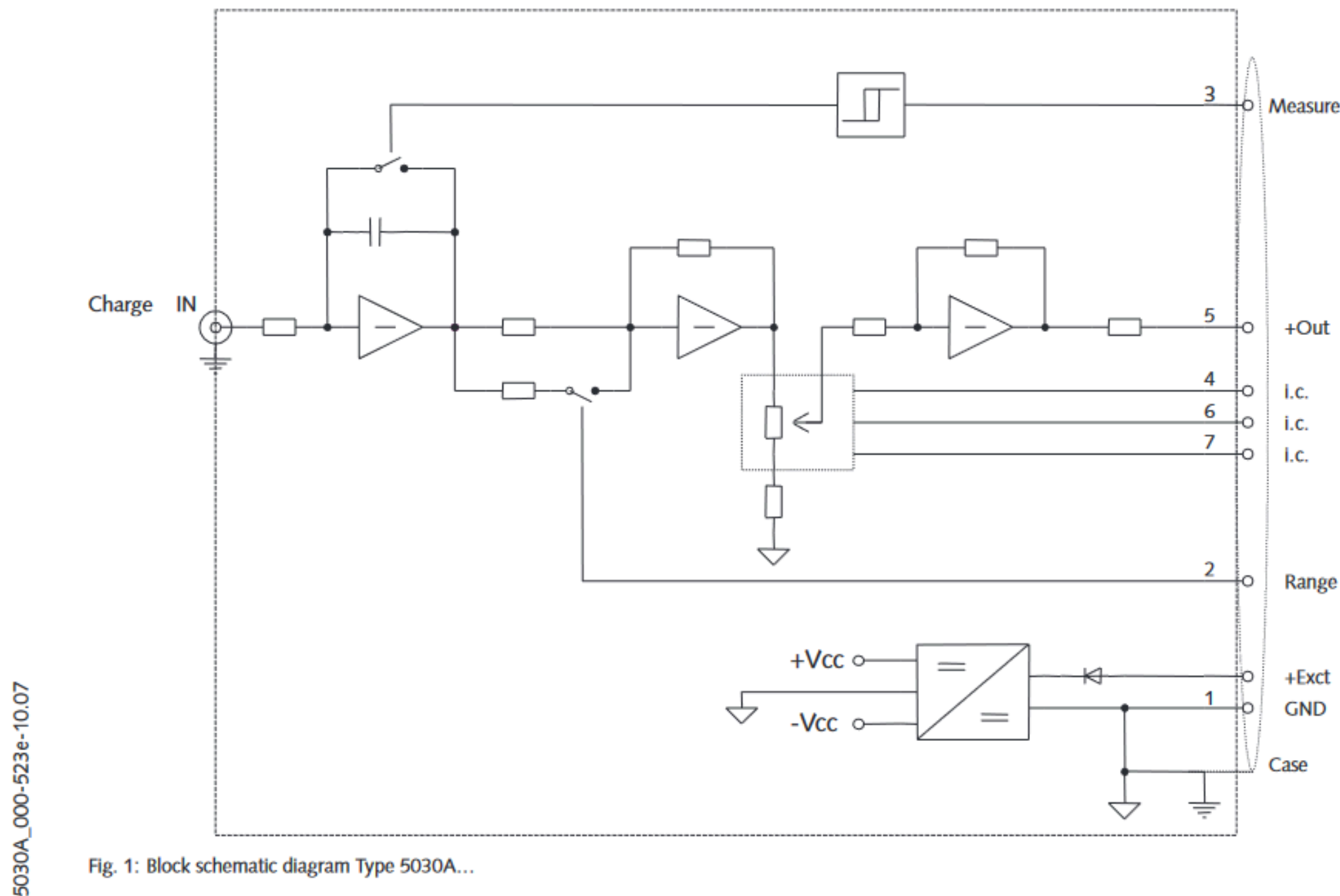


Schéma d'un amplificateur de charge Kistler. On trouve un *intégrateur*, un circuit de *reset* et un amplificateur avec des options de gain.

Note

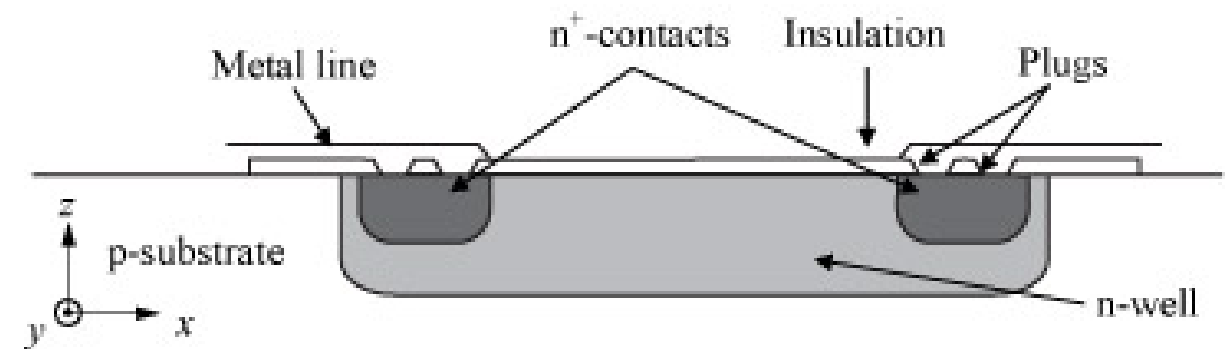
L'amplificateur se décline sous différentes variantes, avec sortie analogique ou numérique telle que IO-link.

7.12 Principes de mesure de l'accélération, suite

- Capteurs piézo-résistifs

Les accéléromètres piézo-résistifs sont constitués d'une masse portée par des éléments élastiques. Cette lame est équipée de 2 ou 4 jauges piézo-résistives montées en pont de Wheatstone. La résistance électrique de ces jauges varie en fonction de la déformation de la lame, donc en fonction de l'accélération de la masse.

Pour un courant I , la tension V_r sur le capteur évolue selon une équation de la forme



$$V_r = R_0 \left[1 + \pi_L \sigma_{xx} + \pi_T (\sigma_{yy} + \sigma_{zz}) \right] I \quad \text{Capteur piezo-résistif}$$



Info

La piézorésistivité s'apparente à la jauge de contrainte. Il y a 2 phénomènes qui apparaissent :

La variation mécanique de longueur cause une variation de résistance *géométrique* à cause de la variation de longueur.

$$R = \frac{l + \Delta l}{S} \rho$$

La contrainte qui apparaît dans les matériaux fait varier la résistance *spécifique*.

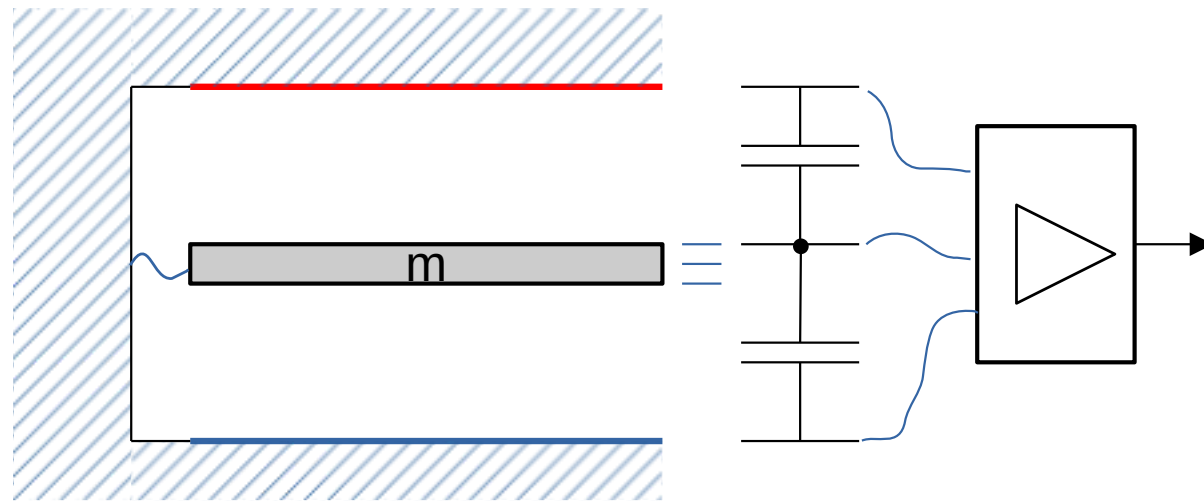
$$\rho_\sigma = \frac{\left(\frac{\partial \rho}{\partial \epsilon} \right)}{\epsilon}$$

[détails ici](#)

7.13 Principe de mesure de l'accélération, encore

- Capteur capacitif

Le déplacement d de la masse sismique m entre les armatures (rouge et bleu) entraîne des variations de capacité qui sont fonction de l'accélération.



Modèle du capteur d'accélération capacitif

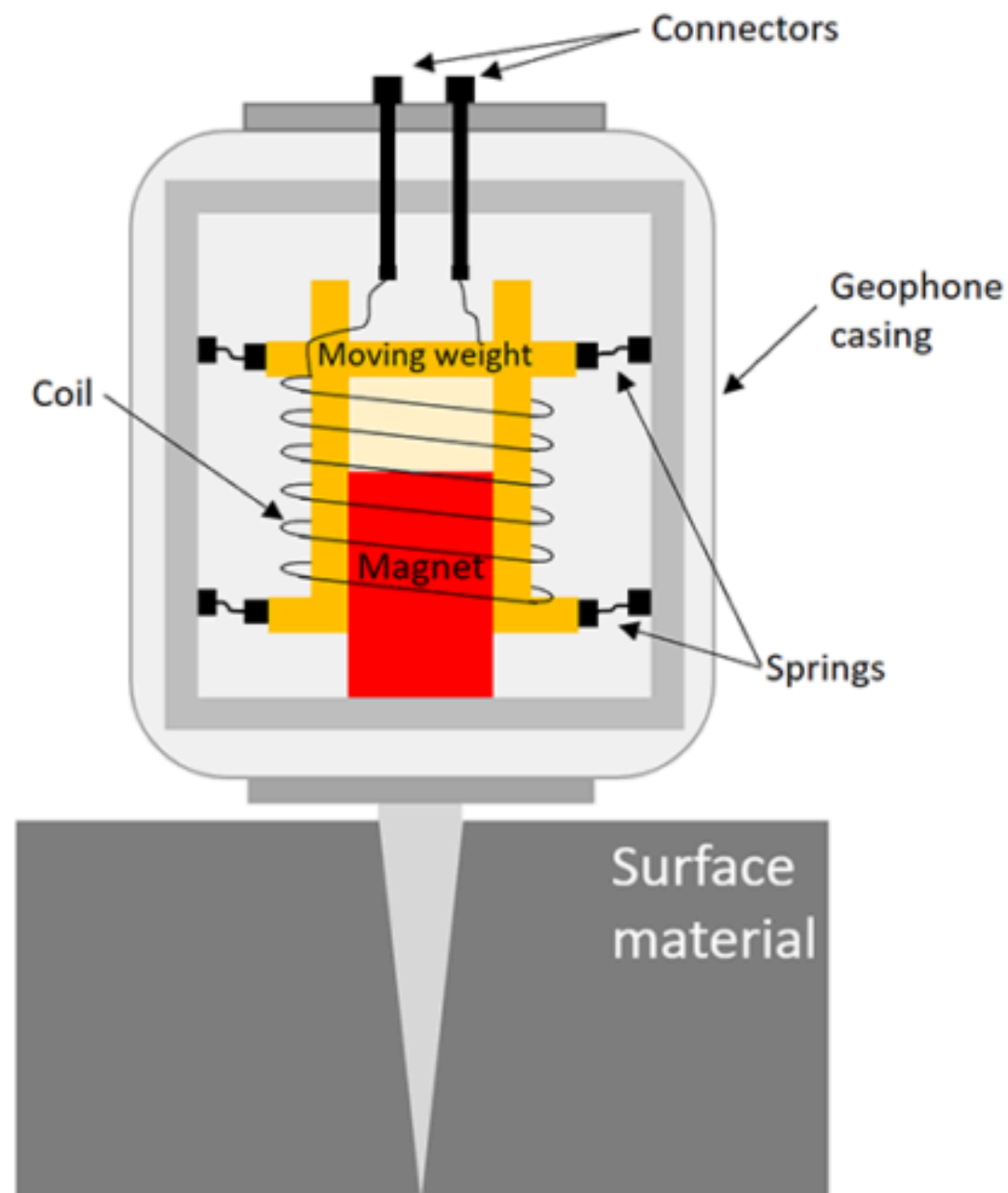
La masse est suspendue par un système de ressort. L'amortissement peut être généré par l'air entourant la masse suspendue.



7.14 Encore d'autres variantes d'accéléromètres

- Géophone

Ce capteur est utilisé pour la détection de secousses sismiques. Il a une bande passante très basse. Le principe est de mesurer une tension induite sur une bobine. La structure est comparable à celle d'un haut-parleur.



Principe du géophone

7.15 Variantes dans le tout petit

- Micro Electro Mechanical Systems : **MEMs**

La réalisation de composant mécaniques sur du silicium permet de réaliser des capteurs d'accélération intégrés avec leur électronique.



Accéléromètre intégré

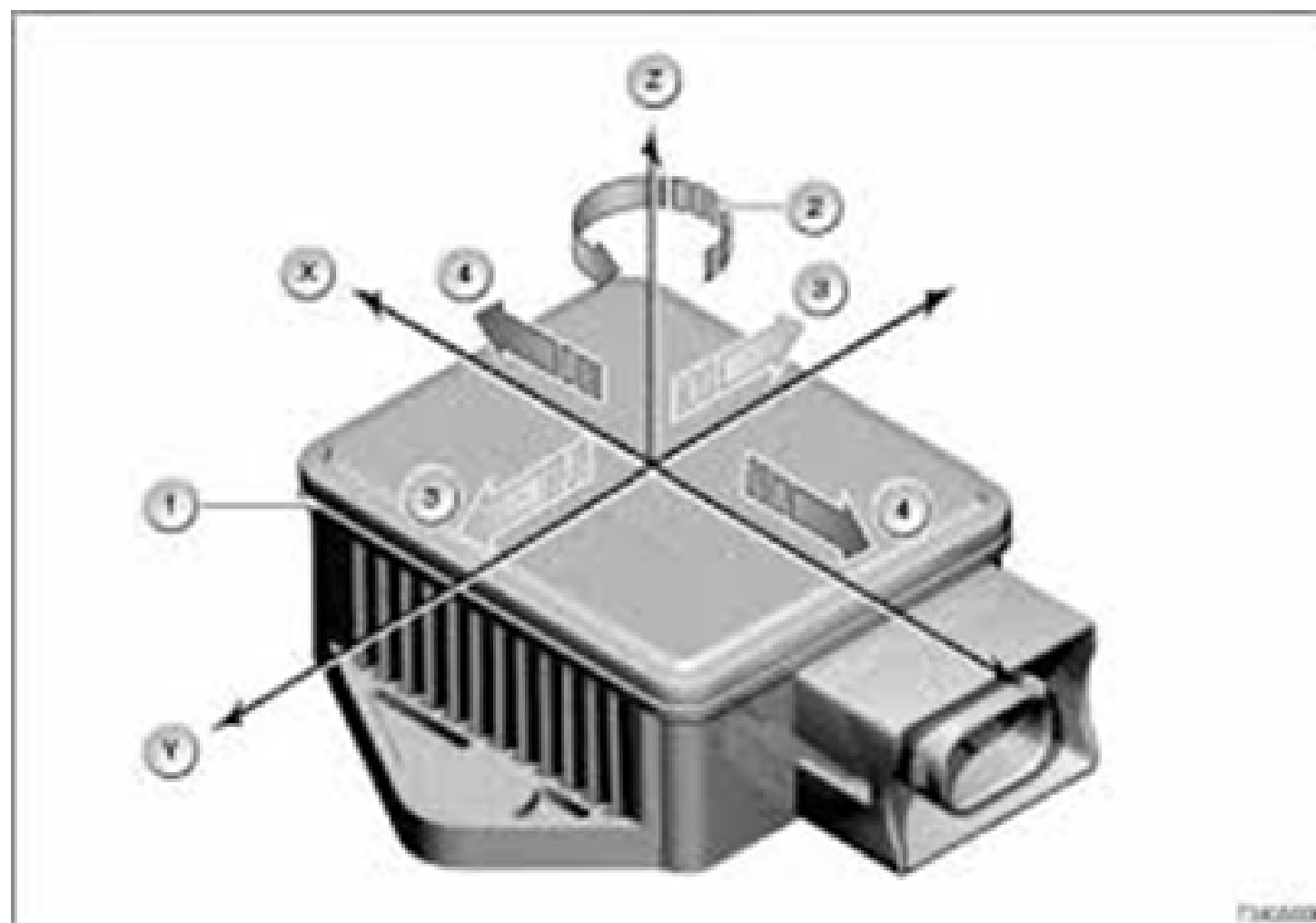
On peut réaliser plusieurs type de capteurs comme les IMUs (Inertial Measurement Units) qu'on retrouve dans les smartphones.

7.16 Capteur d'accélération à asservissement

Le principe est de contrer le mouvement de la masse par un système actif, et de mesurer la force nécessaire pour empêcher le mouvement. Cette force est proportionnelle à l'accélération.

Les caractéristiques essentielles de ce type de capteur sont les suivantes :

- grande précision (erreur inférieure à 0,1 % de l'étendue de mesure),
- très bonne résolution (10^{-6} g),
- étendue de mesure : de ± 1 g à ± 50 g selon les modèles,
- coût élevé.



Capteur d'accélération asservi

7.17 Exercices

- Un peu de pratique : `ex_7.2_accelerometre_piezo.ipynb`
- Exercices Instr_7_exercices
 - Au moins l'exercice 7.1