— MEC2115 & AER2100 —

Méthodes expérimentales et instrumentation en mécanique

Smail Guenoun

Local C-318.5, tél. 514 340-4711 ext. 4153
smail.guenoun@polymtl.ca

Jérôme Vétel (coordonateur)

Local C-305.1, tél. 514 340-4711 ext. 2961
jerome.vetel@polymtl.ca

Plan du cours

0. Préambule
1. Introduction à la mesure
2. Caractéristiques métrologiques – Incertitudes
3. Mesure de température
4. Mesure de position
5. Système d'acquisition
6. Traitement de signal
7. Jauges de déformation
8. Capteurs à base de jauges
9. Forces et couples
10. Mesures en mécanique des fluides
11. Mesures en mécanique des fluides (suite)

8
Capteurs à base de jauges

8.1 Introduction
8.2 Types de capteurs à base de jauges
8.3 Critères de conception des capteurs
8.4 Applications des capteurs à base de jauges
8.5 section TP
8.6 section LabVIEW

-Yoda

A Jedi uses the Force for knowledge and defense, never for attack !

Question trivia avant de commencer

Comment ça marche ?

Figure – Une balance électronique de cuisine.

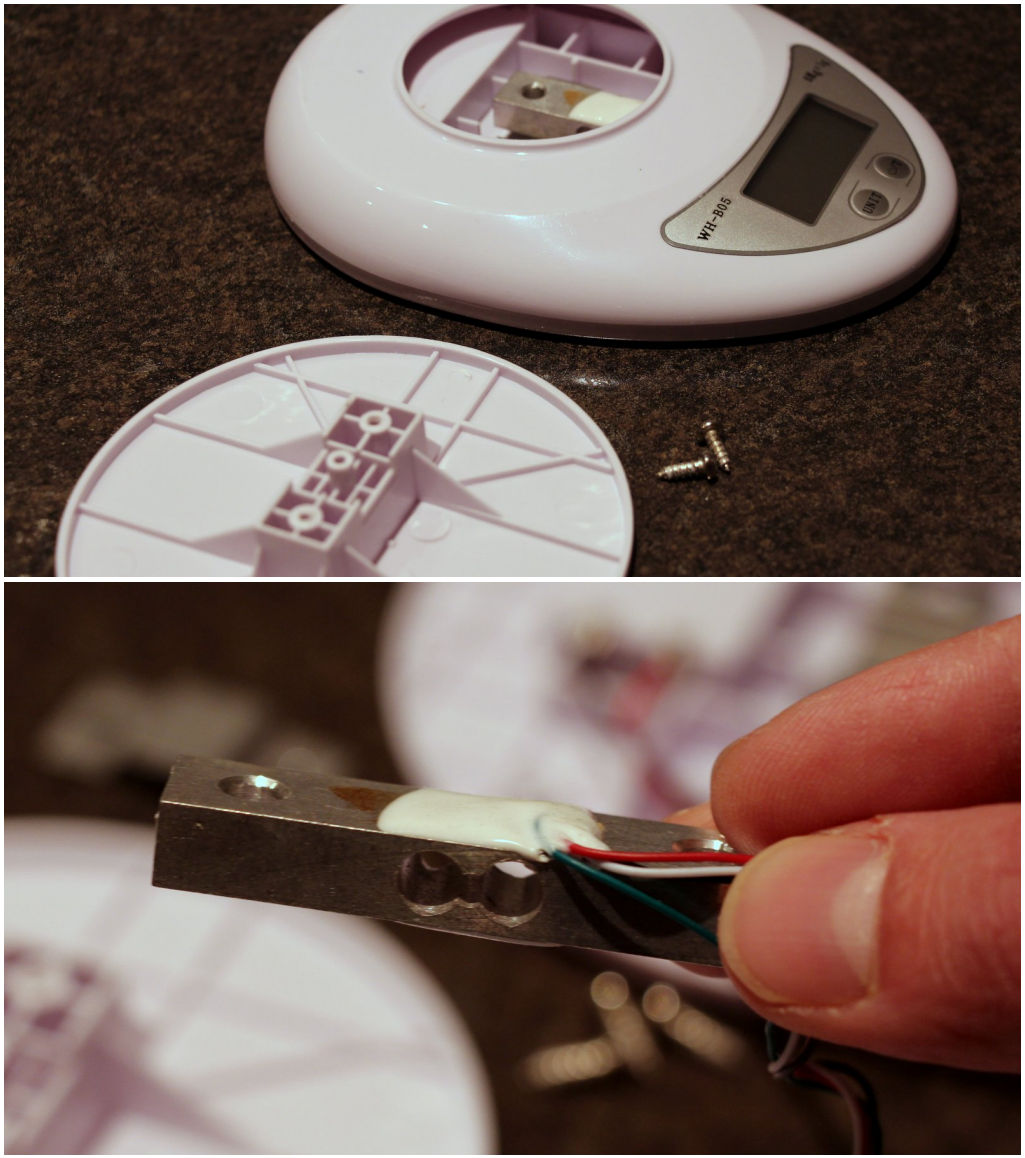


Figure – À l'intérieur d'une balance : un capteur à base de jauges !

Qu'est-ce qu'un capteur à base de jauge ?

Un capteur à jauges comprend trois éléments :

- **Corps d'épreuve** : dispositif mécanique transformant le mesurande en déformation ;
- **Détecteur** : une ou plusieurs jauges convenablement disposées ;
- **Circuit de conditionnement** : (pont de Wheatstone et autres circuits si nécessaires.

8
Capteurs à base de jauges

8.1 Introduction
8.2 Types de capteurs à base de jauges
8.3 Critères de conception des capteurs
8.4 Applications des capteurs à base de jauges
8.5 section TP
8.6 section LabVIEW

Capteur axial (traction compression)

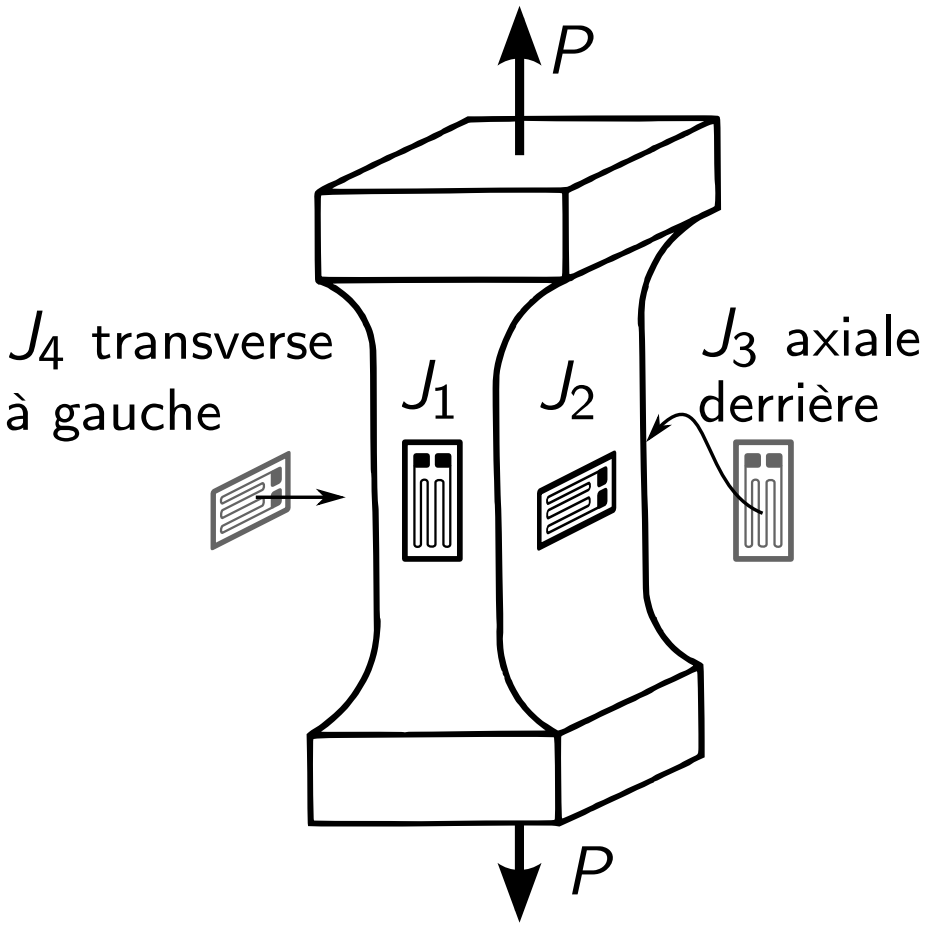


Figure – Capteur de force de tension/compression. Image adaptée de [2].

Pour un capteur avec une aire de section A fait d'un matériau à module d'Young E :

- $\epsilon_1 = \epsilon_3 = \dfrac{P}{AE}$
- $\epsilon_2 = \epsilon_4 = -\nu\epsilon_1 = -\nu\epsilon_3$

$$\Delta E_m = \frac{V}{4} S_G \left[2\left(1+\nu\right)\epsilon_1\right] = \frac{VP}{2AE} S_G \left(1+\nu\right)$$

Capteur en compression

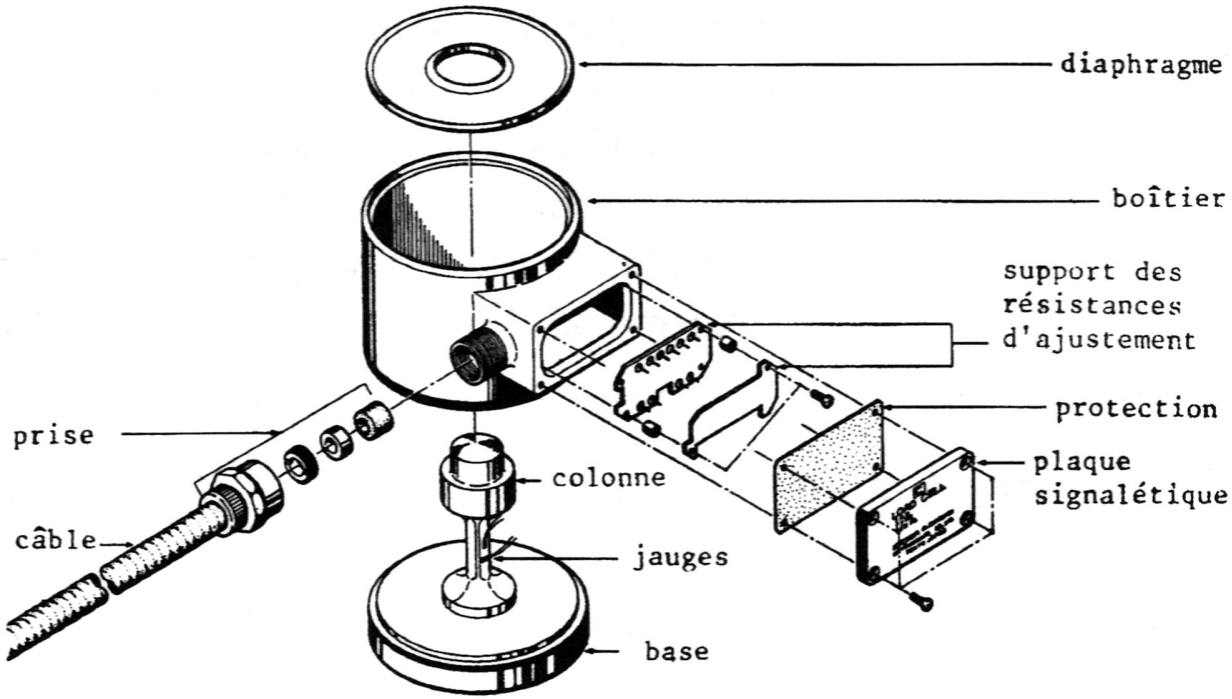


Figure – Exemple de constitution d'un capteur de force en compression. Capteur Kyowa tiré de [1].

Poutre en flexion (demi pont)

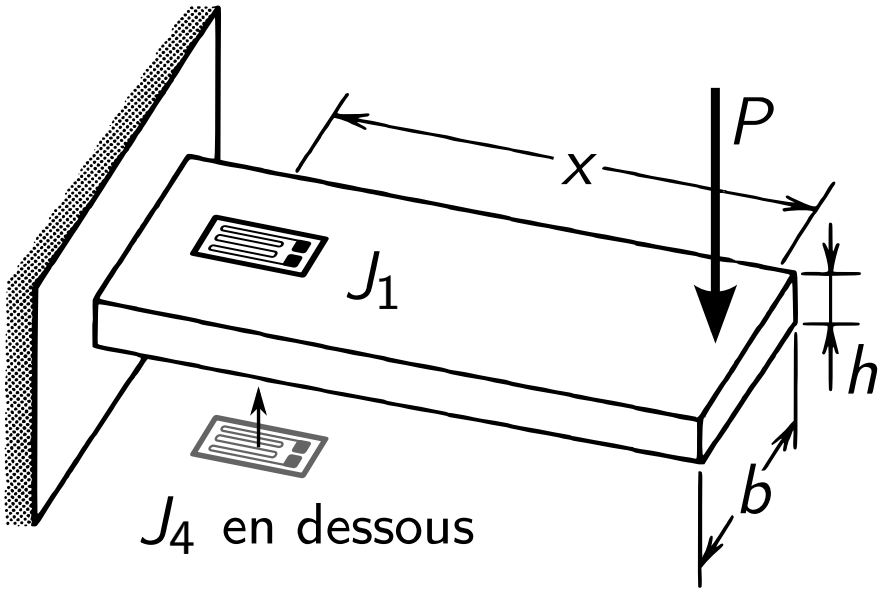


Figure – Lame rectangulaire en flexion (demi pont). Image adaptée de [2].

Pour un capteur fait d'un matériau à module d'Young E :

- $\epsilon_1 = \dfrac{6Px}{Ebh^2}$
- $\epsilon_1 = -\epsilon_4$

$$\Delta E_m = \frac{V}{4} S_G \left(2\epsilon_1\right) = \frac{3VPx}{Ebh^2} S_G$$

Capteur en torsion

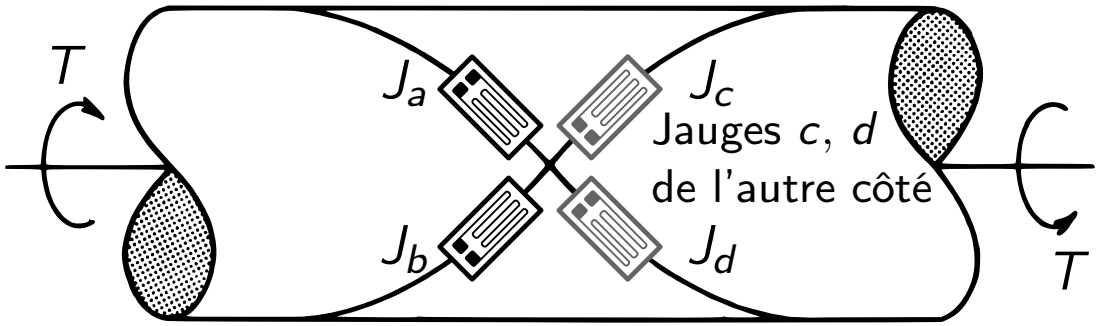


Figure – Couplemètre avec jauges à 45°. Image adaptée de [2].

Pour un capteur fait d'un matériau à module de cisaillement G et moment polaire J :

- $\gamma_{x\theta} = \dfrac{\tau_{x\theta}}{G} = \dfrac{Tr}{GJ}$;
- $G = \dfrac{E}{2(1+\nu)}$; $J = \dfrac{\pi r^4}{2}$
- $\epsilon_a = \epsilon_c = \gamma_{x\theta}/2$
- $\epsilon_b = \epsilon_d = -\gamma_{x\theta}/2$

$$\Delta E_m = \frac{V}{4} S_G \left(2\gamma_{x\theta}\right) = \frac{VT}{\pi r^3 G} S_G$$

Poutre en cisaillement

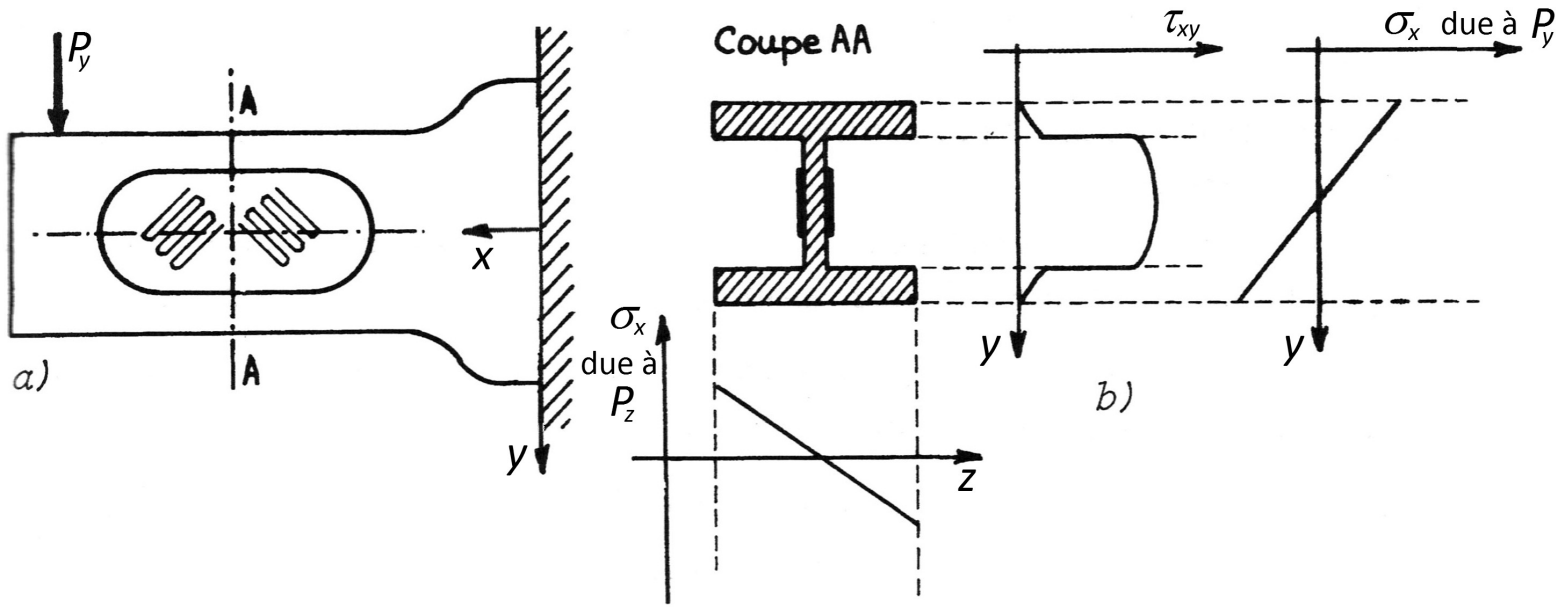


Figure – (a) capteur de force à cisaillement ; (b) coupe et champs de contraintes : cisaillement τ_{xy} et flexion σ_x dues à P_y et flexion σ_x due à une force transversale P_z. Image adaptée de [1].

- $\epsilon_{45^\circ} = \dfrac{1}{E}(1+\nu)\,\tau_{xy} = \dfrac{\tau_{xy}}{2G}$
- $\tau_{xy} = \dfrac{PQ}{Ib}$

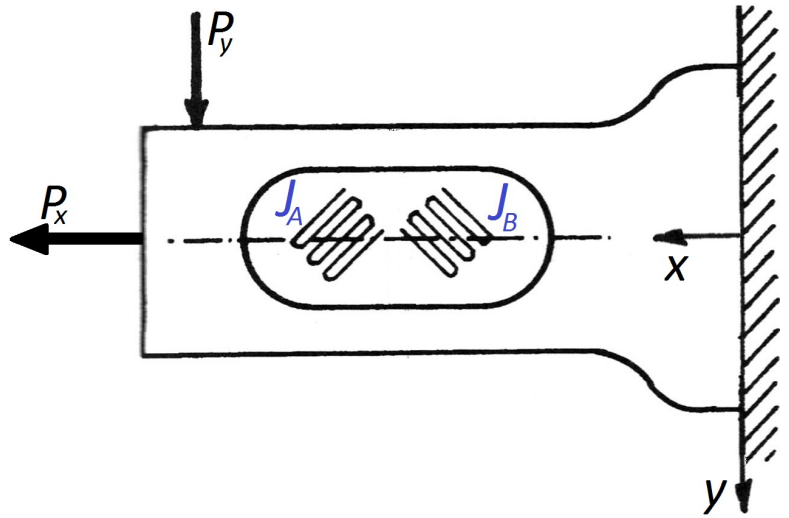
Pour un pont complet

$$\Delta E_m = \frac{V}{4} S_G \left(4\epsilon_{45^\circ}\right) = \frac{VPQ}{2GIb} S_G$$

Problème diapo [8.1]

Capteur de force à cisaillement

Le capteur de force à cisaillement sur la figure de droite est conçu pour mesurer l'effort tranchant P_y. Le corps d'épreuve a une section d'aire A et est fait d'un matériau avec module d'Young E et coefficient de poisson ν.



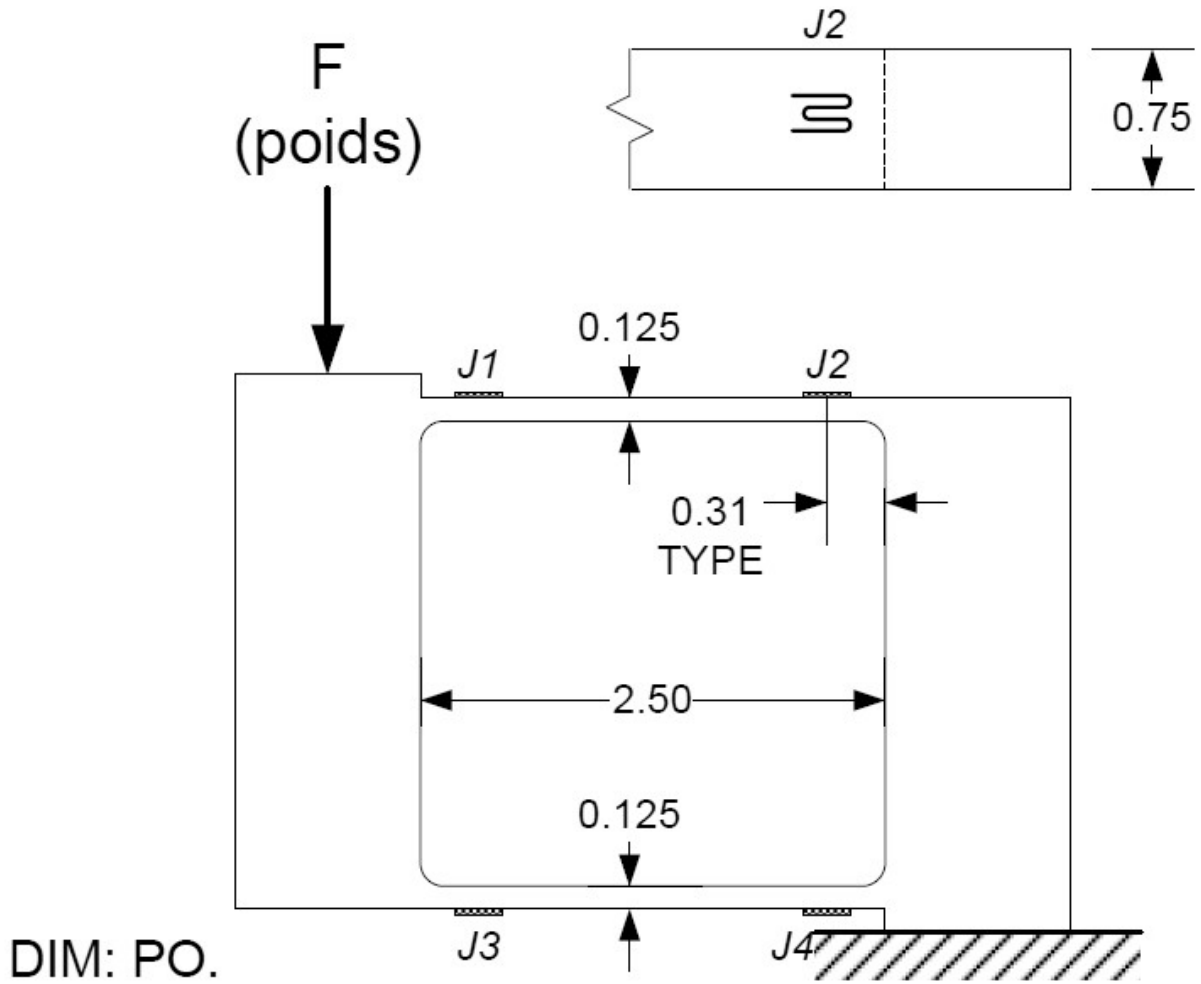
Si seulement la jauge J_A est branchée en quart de pont, quelle sera la sensibilité du capteur ΔE_m à une force parasite P_x de direction axiale ?

Fonctionnement des capteurs

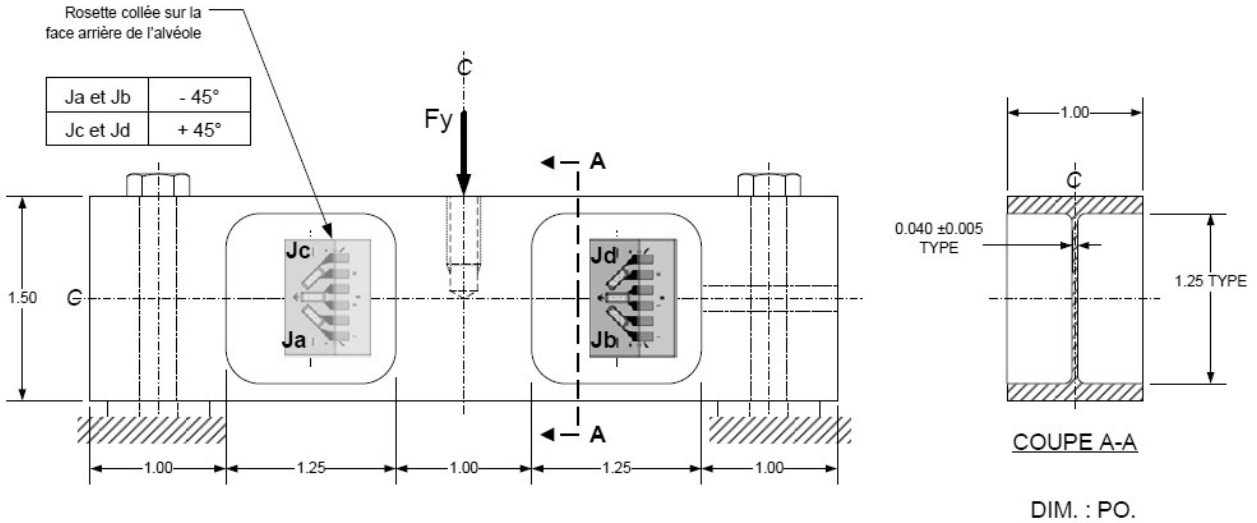
Les trois diapositives suivantes présentes des diagrammes et des photos de différents capteurs à base de jauges. Pour chacun d'eux :

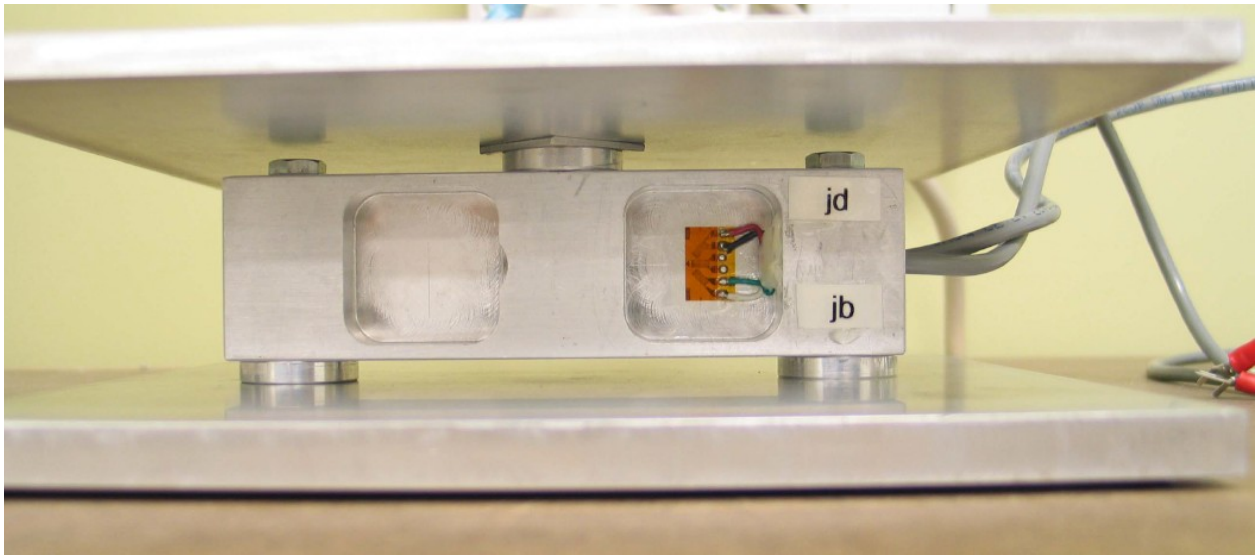
1. Schématiser la déformation du capteur pour mettre en évidence son mode de fonctionnement.
2. Nommer le type de déformation principal du corps d'épreuve utilisé pour faire la mesure.
3. Disposer les jauges sur un pont de Wheatstone afin de maximiser le signal proportionnel à l'effort appliqué.
4. Réfléchir à la sensibilité du capteur à la position exacte du point d'application de la force.
5. Réfléchir à la sensibilité du capteur à un effort parasite, i.e., une force perpendiculaire à la force appliquée, ou un moment.

Problème diapo [8.2]

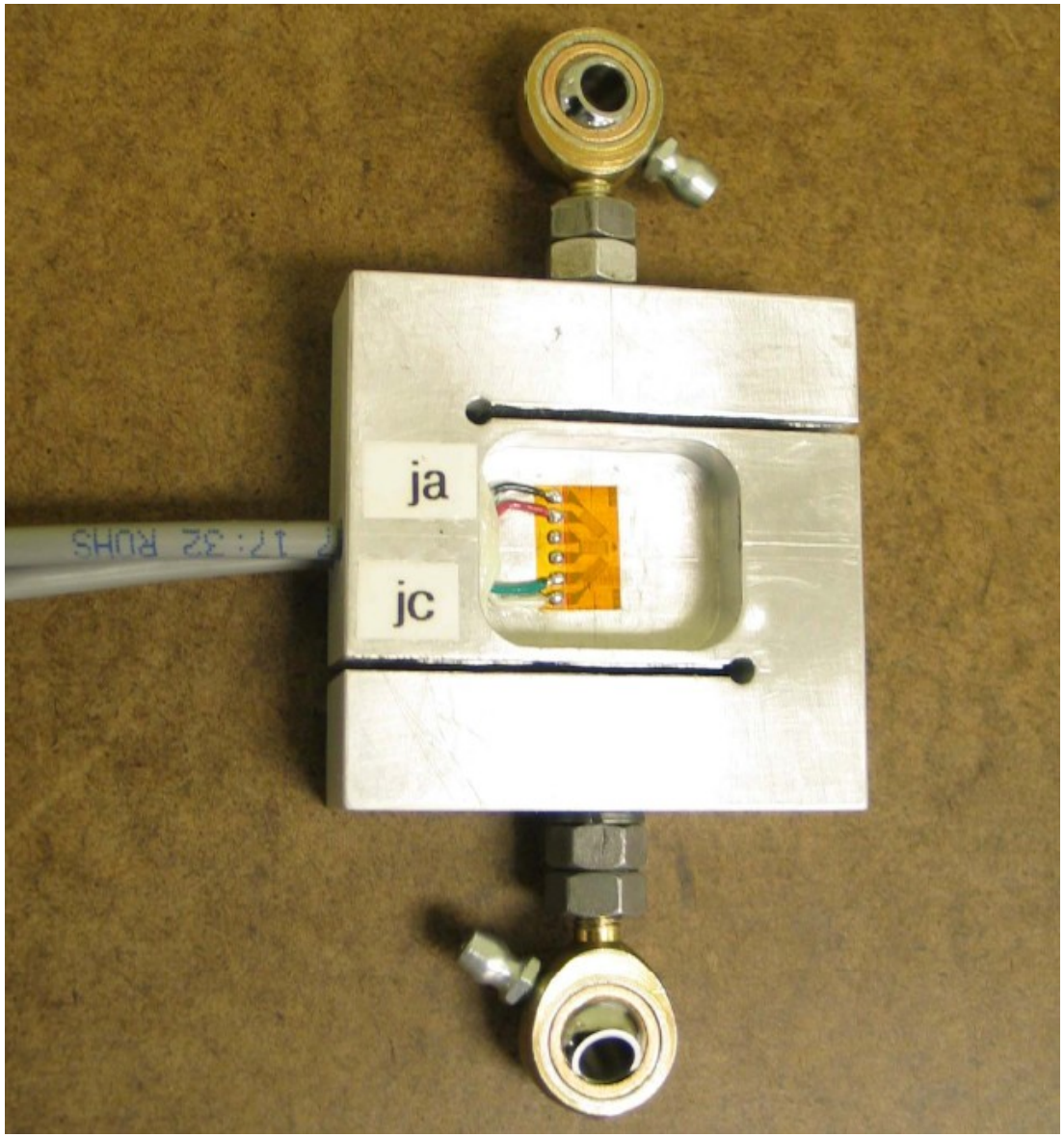


Problème diapo [8.3]





Problème diapo [8.4]



Problème diapo [8.5]

On veut mesurer le couple T dans un arbre de section circulaire de rayon R. On installe donc quatre jauges J_a, J_b, J_c et J_d sur l'arbre.

1. Comment doit-on positionner les jauges sur l'arbre afin d'obtenir la plus grande sensibilité tout en éliminant les sollicitations parasites dues à la température et à des forces axiales et latérales ? Faites un diagramme pour montrer la position des jauges sur l'arbre et identifier les jauges dans le diagramme.
2. Comment doit-on configurer les jauges dans le pont de Wheatstone pour optimiser l'output du pont ? Identifier la position des jauges dans le diagramme du pont. Démontrez comment les sollicitations parasites sont éliminées.
3. Donnez l'équation représentant l'output théorique du pont (voltage en fonction de T).

8
Capteurs à base de jauges

8.1 Introduction
8.2 Types de capteurs à base de jauges
8.3 Critères de conception des capteurs
8.4 Applications des capteurs à base de jauges
8.5 section TP
8.6 section LabVIEW

Caractéristique d'un capteur idéal

- **Flèche** : faible pour un capteur de force ;
- **Déformation** : préférablement inférieure à 1000 μm/m pour une plus de linéarité et une longue durée de vie ;
- **Contrainte** inférieure à $\sim 0.25\sigma_y$ dans corps d'épreuve permet comportement linéaire et bonne tenue en fatigue ;
- **Variation de température** : compensée par un demi pont ou un pont complet. Si les fluctuations de température sont importantes, alors choisir un matériau à faible coefficient de dilatation et des jauges bien autocompensées pour ce matériau ;
- **Effets mécaniques parasites** : amoindries par géométrie maximisant ϵ pour l'effet mécanique désiré ;
- **Fréquence naturelle** du capteur $> 1.5\times$ fréquence de la mesurande et un amortissement interne adéquat ;
- **Hystérésis** : éviter pièces mobiles, frottement, corps d'épreuve en polymère ;
- **Protection** contre surcharge (butée).

Matériau du corps d'épreuve

	Acier à ressorts 45SCD6	**Cuivre-Bérylium CuBe2**	**Aluminium 7049A**
Module d'Young E (Pa)	220×10^9	130×10^9	72×10^9
Coefficient de temp. de E ($^\circ C^{-1}$)	-0.26×10^{-3}	-0.38×10^{-3}	-0.58×10^{-3}
Coefficient de Poisson ν	0.285	0.34	0.34
Coefficient de dilatation thermique ($^\circ C^{-1}$)	13×10^{-6}	17×10^{-6}	23.5×10^{-6}
Limite élastique à 2% σ_y (Pa)	1.45×10^9	0.8×10^9	0.45×10^9
Masse volumique (kg/m^3)	7800	8250	2800

Table – Caractéristiques mécaniques d'alliages typiques pour corps d'épreuve de capteurs de force. Tableau adapté de [1].

8
Capteurs à base de jauges

8.1 Introduction
8.2 Types de capteurs à base de jauges
8.3 Critères de conception des capteurs
8.4 Applications des capteurs à base de jauges
8.5 section TP
8.6 section LabVIEW

Application d'un capteur en compression

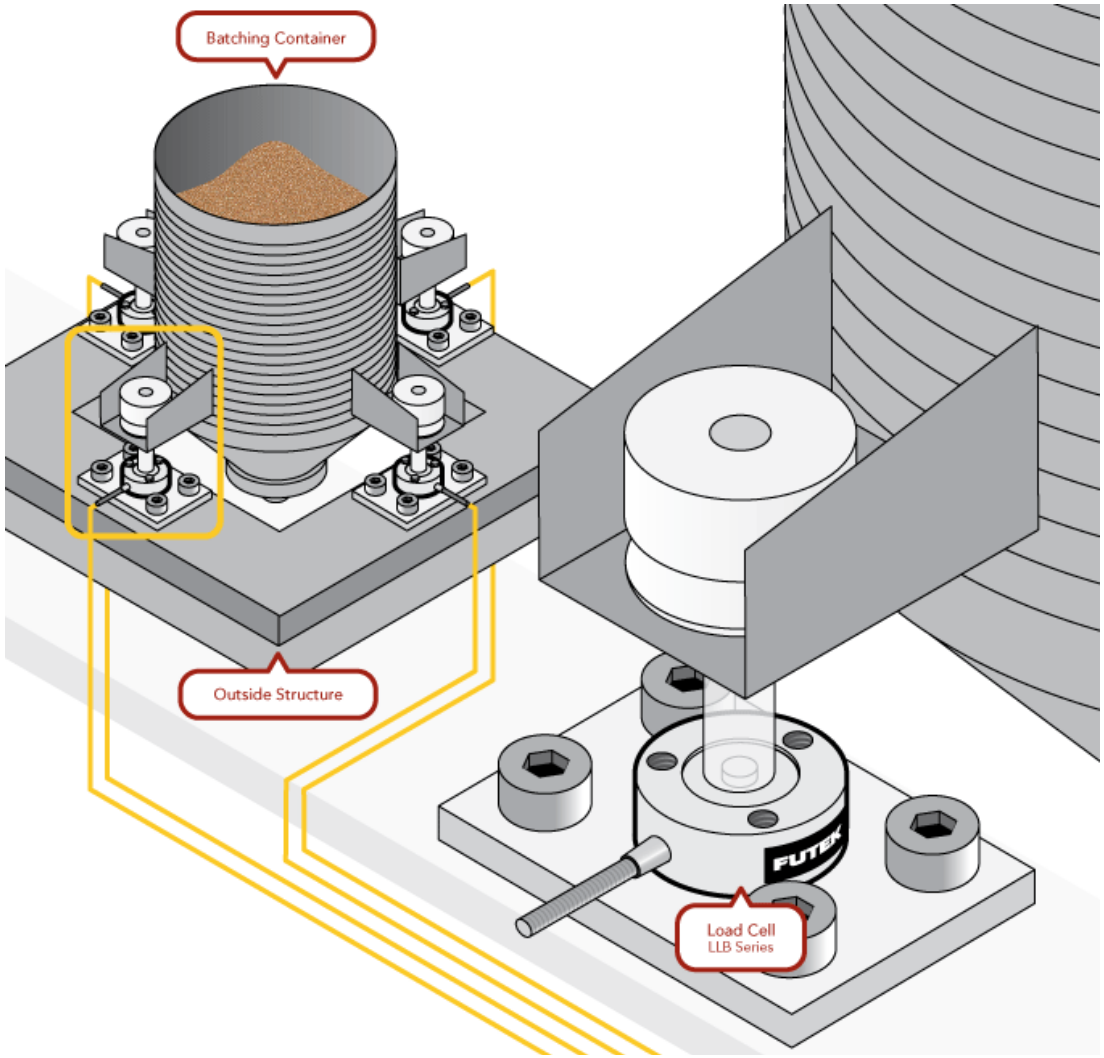


Figure – Exemple d'utilisation de capteurs de force en compression pour peser le contenu d'un silo. Crédit www.futek.com.

Mesure de la puissance d'un cycliste

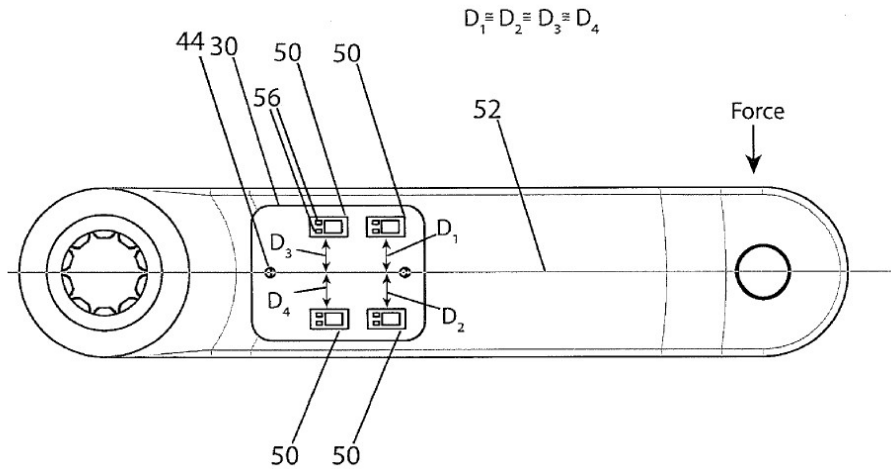


Figure – Capteur utilisant une manivelle ou "crank" d'un pédalier de vélo comme corps d'épreuve. Ce capteur sert à mesurer la puissance transmise par le cycliste au pédalier. Crédit : www.stagescycling.com et brevet [4].

Dans cette application, l'étanchéité de l'enveloppe du capteur est critique pour garder la poussière et l'eau loin des jauges.

Capteurs fonctionnant en cisaillement

Les capteurs de force à cisaillement sont compactes, rigides, peu sensibles aux efforts hors de leur axe, et offrent une protection à la surcharge.

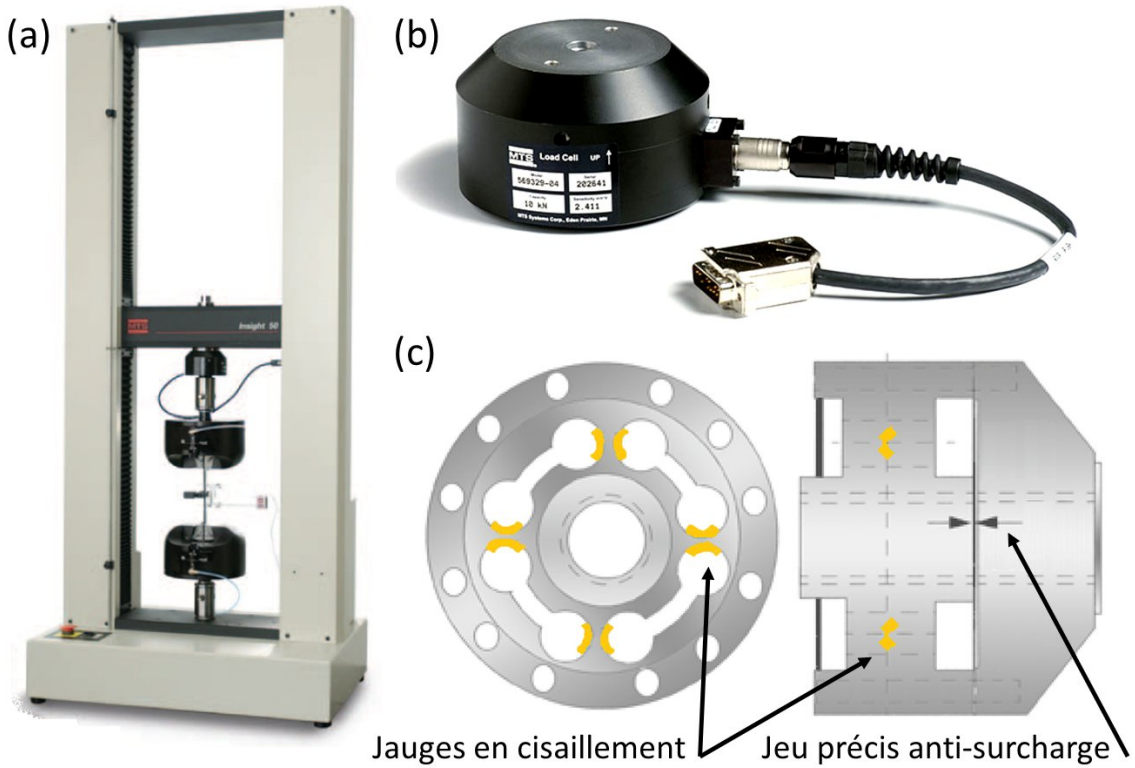


Figure – (a) Machine d'essai mécanique uniaxial du laboratoire LM^2 de M. Lévesque ; (b) cellule de force de 10 kN ; (c) diagramme d'un capteur de force à cisaillement ou "pancake loadcell".

Microscope à force atomique (AFM)

La plupart des microscopes à force atomique fonctionnent avec un laser qui mesure la déviation du levier. Cependant, les AFM à base de silicone piezorésistif offrent un fonctionnement plus robuste pouvant être parallélisé.

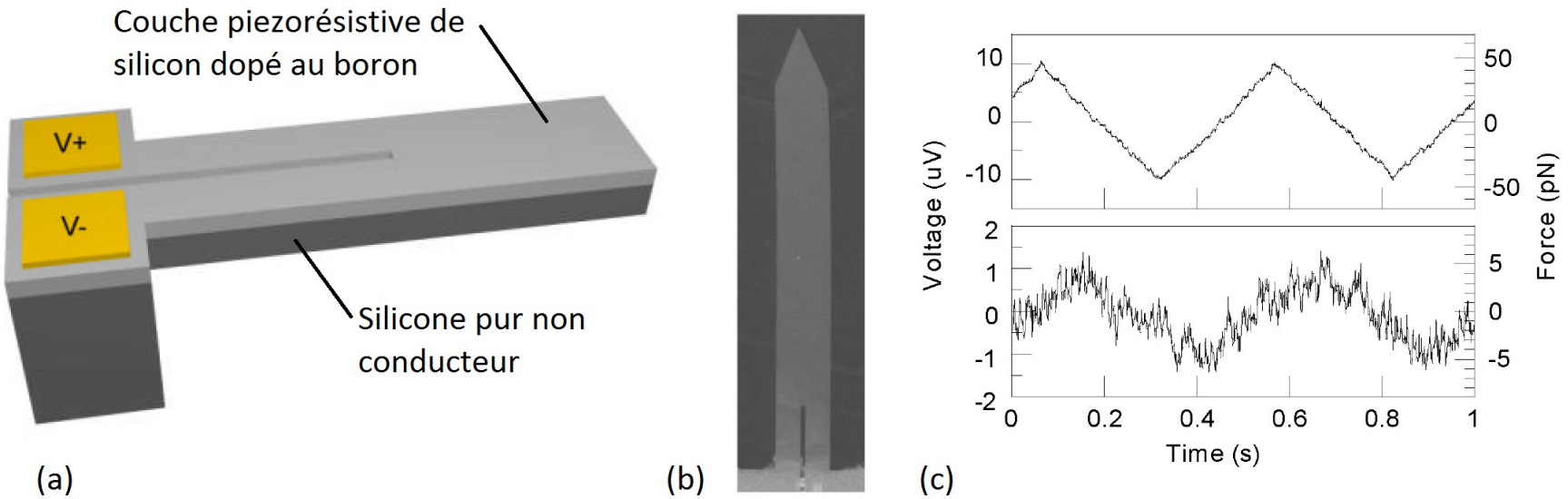


Figure – (a) Schéma d'une sonde piezorésistive en porte-à-faux ; (b) Image d'une sonde de 90 nm × 350 μm × 44 μm ; (c) réponse de la sonde à des déplacements forcés de 1 μm et 0.1 μm. (Crédit : [3])

Microscope à force atomique sur Mars !

La sonde Phoenix s'est posée sur Mars le 25 mai 2008 avec à son bords un AFM piezorésistif ayant pour but d'étudier la poussière martienne. En analysant la géologie, on a pu découvrir des indices de la présence d'eau sur Mars [6].

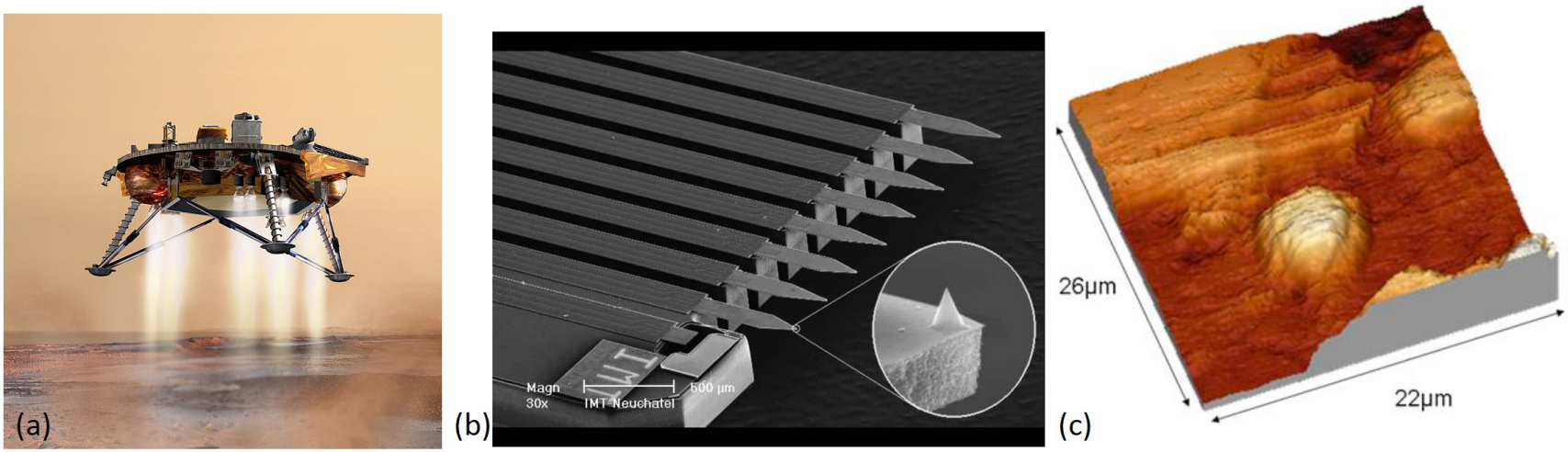


Figure – (a) Vue d'artiste de Phoenix se posant sur Mars ; (b) Image des 8 sondes AFM de Phoenix ; (c) Image AFM de quatre particules martiennes. (Crédit : http ://www.jpl.nasa.gov et [6])

L'homme bionique couvert de capteurs

Des chercheurs de Harvard [5] ont fabriqué des senseurs flexibles pouvant être portés et répondant aux mouvements du corps.

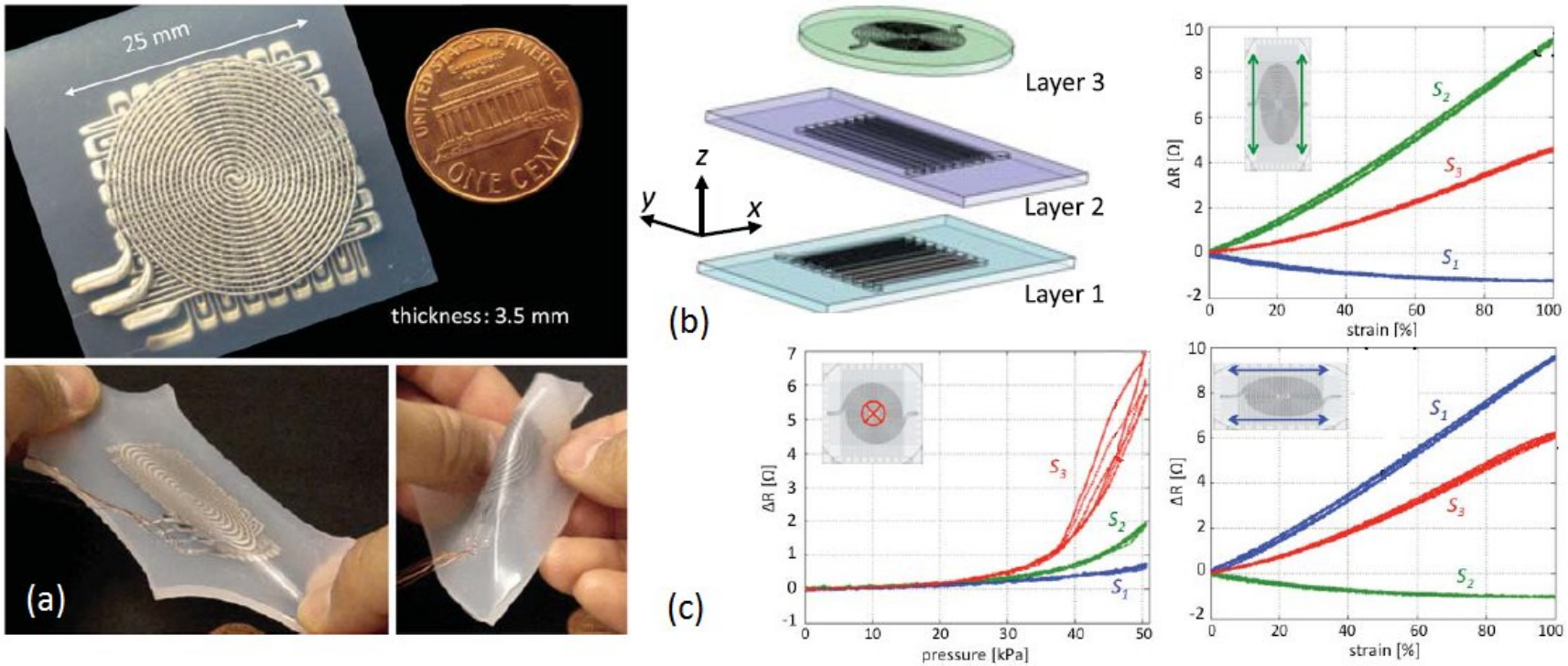


Figure – (ab) Senseur flexible composé de microcanaux moulés en polymère remplis de Gallium-Indium eutectique, un métal conducteur liquide à température ambiante ; (c) variation de résistance (Crédit : [5]).

PolyOrbite

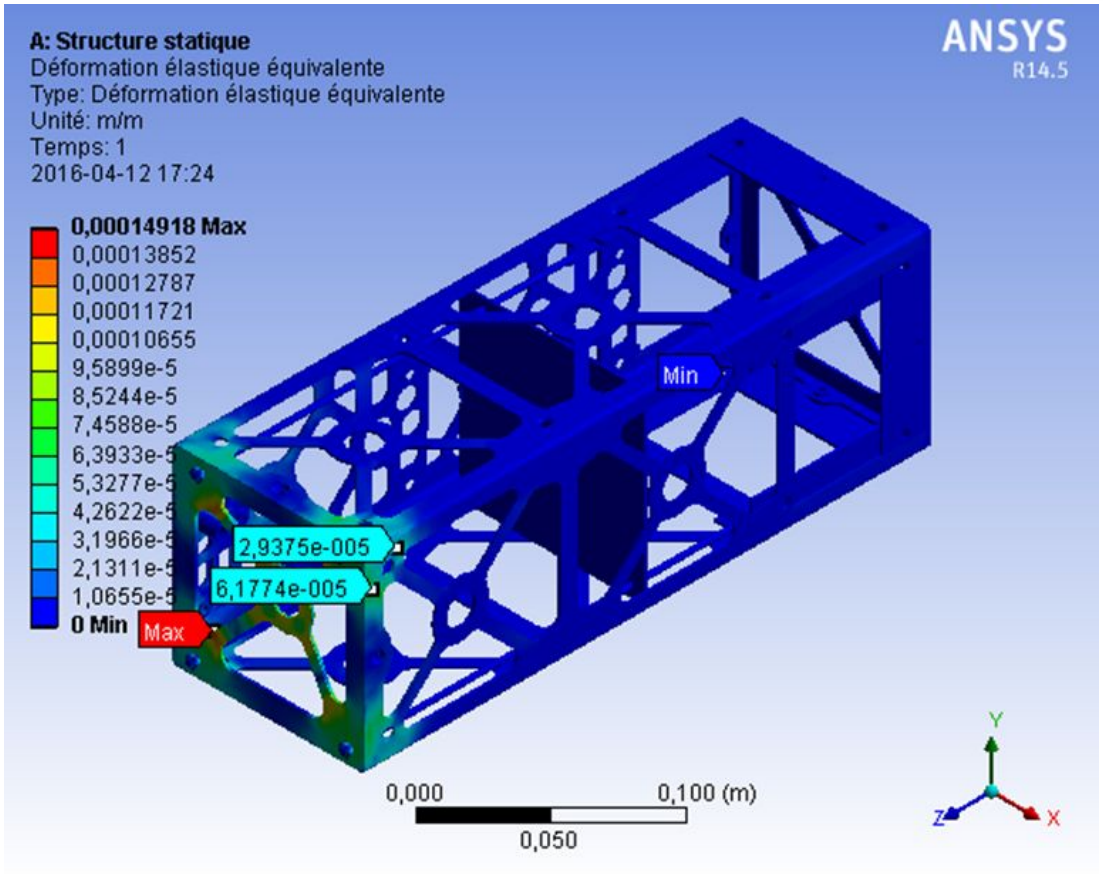


Figure – Dans le cadre de son Projet Intégrateur 3, Louis Attendu a analysé la structure du satellite PolyOrbite soumise au chargement d'un lancement à bord d'une fusée Oronos. Il a ensuite instrumenté le satellite avant son lancement avec des jauges de déformation et un système d'acquisition.

8
Capteurs à base de jauges

8.1 Introduction
8.2 Types de capteurs à base de jauges
8.3 Critères de conception des capteurs
8.4 Applications des capteurs à base de jauges
8.5 section TP
8.6 section LabVIEW

Rapport de laboratoire

Le TP 8 vise à calculer et mesurer la sensibilité du capteur à base de jauges. Nous ferons les mesures nécessaire pour évaluer expérimentalement la sensibilité du capteur et nous calculerons indépendamment la sensibilité avec la théorie.

8
Capteurs à base de jauges

8.1 Introduction
8.2 Types de capteurs à base de jauges
8.3 Critères de conception des capteurs
8.4 Applications des capteurs à base de jauges
8.5 section TP
8.6 section LabVIEW

Case Structure

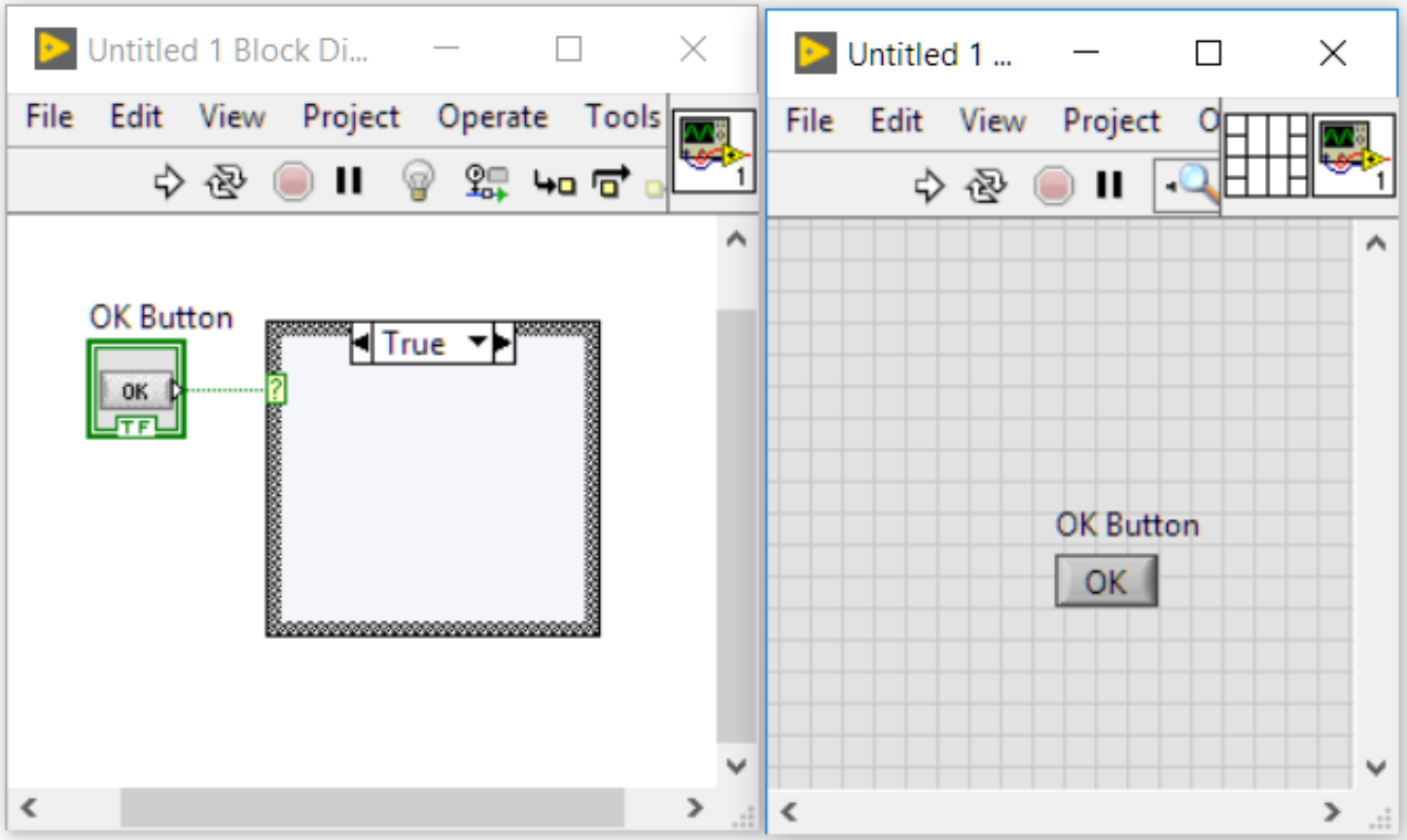


Figure – Un *Case Structure* est l'équivalent d'une commande *if* en langage Matlab. Ici, un *OK Button* est utilisé pour déclencher la condition VRAI.

Write Delimited Spreadsheet

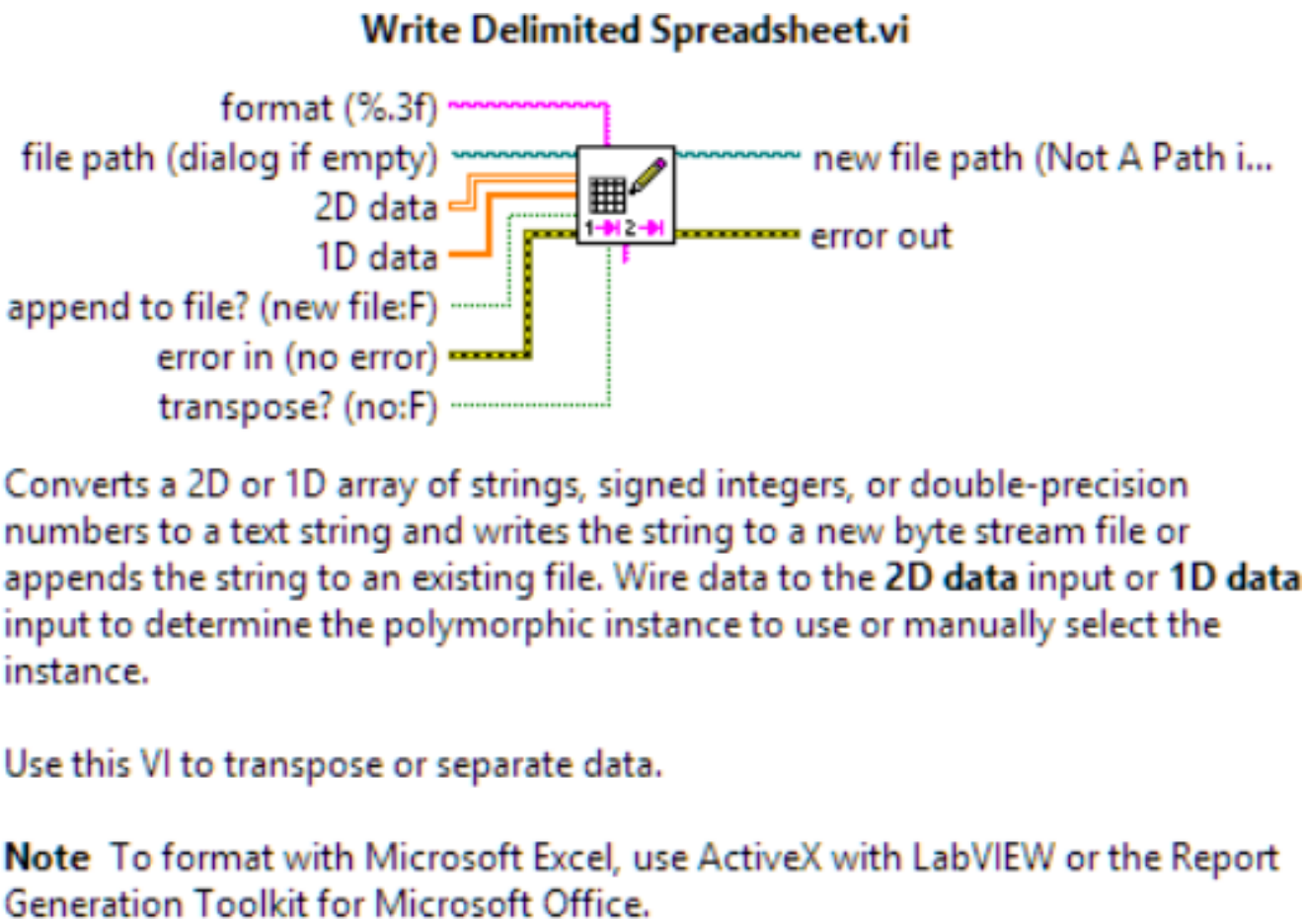


Figure – La commande *Write Delimited Spreadsheet* permet de sauvegarder le contenu d'un array dans un fichier.

Exemple d'écriture dans un fichier

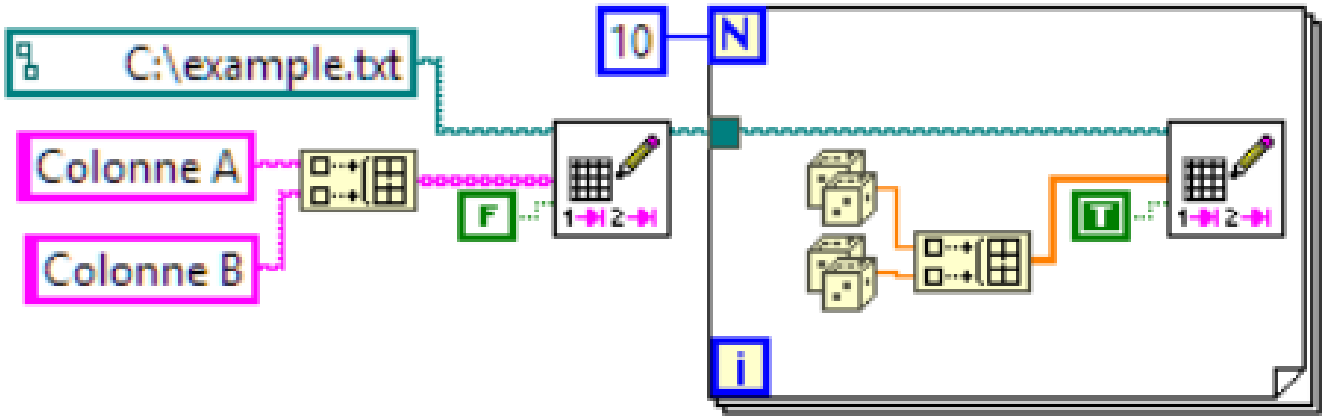


Figure – Exemple d'un VI utilisant deux commandes *Write Delimited Spreadsheet* afin de sauvegarder un tableau avec des titres pour chaque colonne. Notez les constantes VRAI ou FAUX qui permettent de choisir entre écraser (overwrite) un fichier existant ou ajouter les données à la suite (append).

Le résultat

example.txt

	Colonne A	Colonne B
2	0.756	0.969
3	0.179	0.205
4	0.305	0.113
5	0.064	0.789
6	0.192	0.389
7	0.771	0.997
8	0.715	0.608
9	0.421	0.808
10	0.288	0.740
11	0.022	0.116

Figure – Le fichier résultant de l'exemple du transparent précédent. Vous aurez deviné que les VI avec un icône de dés donnent une valeur aléatoire entre 0 et 1.

Bibliographie I

G. Asch.
Les capteurs en instrumentation industrielle - 7ème édition.
Paris : Dunod, 2010.

J.W. Dally, W.F. Riley, and Kenneth G. McConnell.
Instrumentation for engineering measurements.
Wiley international editions. Wiley, 1984.

J.A. Harley.
Advances in Piezoresistive Probes for Atomic Force Microscopy.
PhD thesis, Stanford University, 2000.

Andrew P. Lull and Eric Golesh.
Apparatus, system and method for power measurement.
Unite States Patent Application Publication, (US 2012/0214646 A1), 2012.

Bibliographie II

Y.L. Park, B.R. Chen, and R.J. Wood.
Design and fabrication of soft artificial skin using embedded microchannels and liquid conductors.
Sensors Journal, IEEE, 12(8) :2711–2718, 2012.

P. H. Smith, L. K. Tamppari, R. E. Arvidson, D. Bass, D. Blaney, W. V. Boynton, A. Carswell, D. C. Catling, B. C. Clark, T. Duck, E. DeJong, D. Fisher, W. Goetz, H. P. Gunnlaugsson, M. H. Hecht, V. Hipkin, J. Hoffman, S. F. Hviid, H. U. Keller, S. P. Kounaves, C. F. Lange, M. T. Lemmon, M. B. Madsen, W. J. Markiewicz, J. Marshall, C. P. McKay, M. T. Mellon, D. W. Ming, R. V. Morris, W. T. Pike, N. Renno, U. Staufer, C. Stoker, P. Taylor, J. A. Whiteway, and A. P. Zent.
H2O at the phoenix landing site.
Science, 325(5936) :58–61, 2009.