



Ajustement des capteurs CentoNewton

Ajustement actif et offset des capteurs de force CentoNewton.

Thomas Maeder, 10.8.2006

Projet: CentoNewton.

Mots-Clefs: capteurs de force, forces élevées, CentoNewton.

Table des matières

1. INTRODUCTION	2
2. DIMENSIONNEMENT	3
3. FABRICATION.....	3
4. RESULTATS	6
5. CONCLUSIONS.....	10
6. REFERENCES	10

Résumé

Ce rapport documente l'ajustement de la 1^{ère} version des capteurs de force CentoNewton.

- Concept et remarques générales
- Dimensionnement
- Fabrication
- Résultats des mesures

1. Introduction

Le capteur CentoNewton (schéma, photo et layout en figures 1 et 2) représente une solution potentielle low-cost pour la mesure de forces dans un domaine d'environ 4 à 400 N, pour des substrats en alumine. Son principe de fonctionnement est la flexion en double anneau de son substrat, mesurée au moyen d'un demi-pont piézorésistif (pont de Wheatstone à deux résistances actives seulement, au centre du substrat, sous le plot de mise en charge). La force est appliquée sur le plot de mise en charge, qui transmet la force à l'anneau interne, sérigraphié sur le substrat (côté circuit). Le capteur, qui doit reposer sur un support plan, est soutenu via l'anneau externe, qui est donc situé sous le substrat.

Le principe de mesure et les formules correspondantes, ainsi que des résultats préliminaires, sont documentés en détail dans l'article correspondant [1].

Le circuit d'amplification, quant à lui, est dérivé de l'électronique modulaire du SH200 [2], avec quelques différences :

- Le capteur est ici "tout en un" – pont et électronique sont sur le même substrat.
- Il n'y a que trois ajustements "digitaux" possibles (SH200 : 3+3).
- L'amplificateur est plus low-cost (ces prototypes : MicroChip 601).

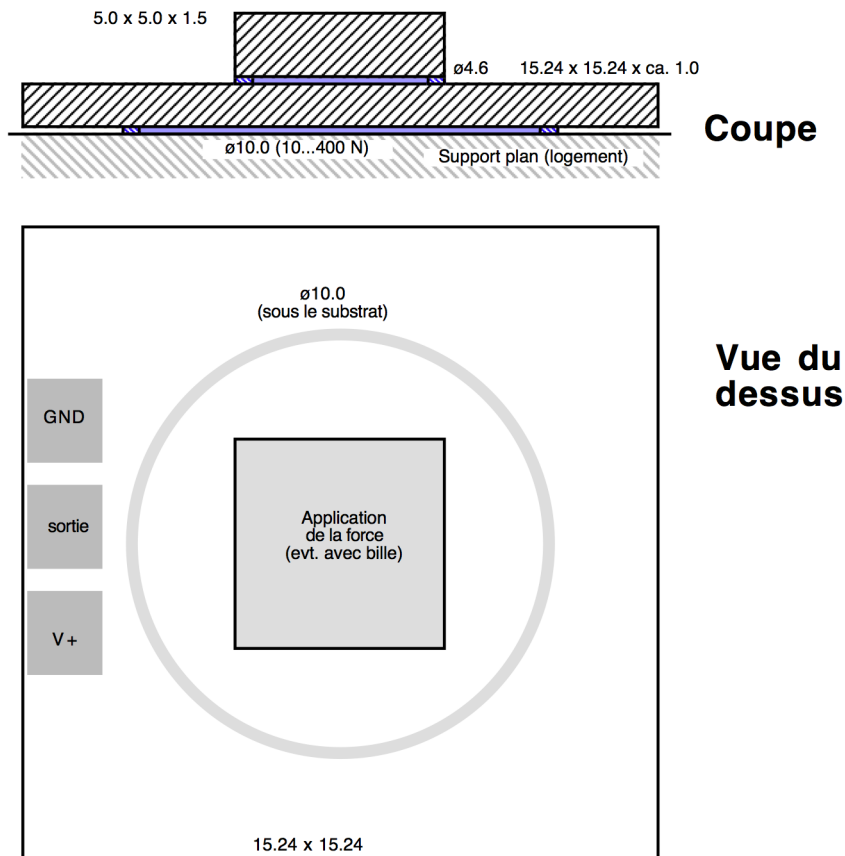


Figure 1. Dessin schématique du prototype de capteur CentoNewton.

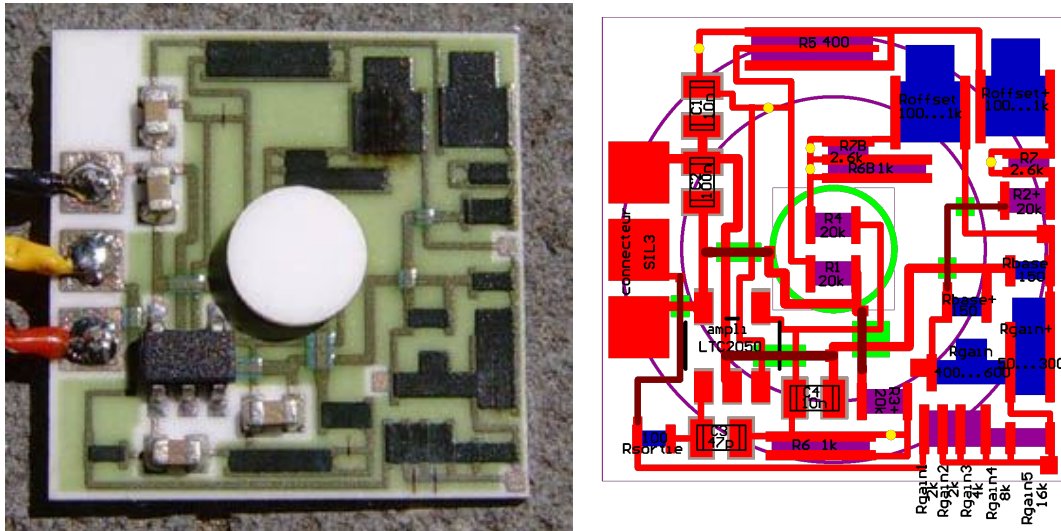


Figure 2. Photo et layout du prototype de capteur CentoNewon.

2. Dimensionnement

Si on utilise l'alumine 96% pour le substrat et la composition résistive DuPont 2041 pour les piézorésistances [3], et que l'on vise une contrainte nominale d'environ 100 MPa (ce qui donne un facteur de sécurité à long terme d'environ 2 [4] pour une contrainte uniaxiale, probablement un peu moins en biaxial), les calculs donnent les paramètres ci-dessous (tableau 1) pour les capteurs [1].

Force nominale F [N]	10	20	40	100	200	400
Épaisseur de substrat h [mm]	0.25	0.30	0.50	0.80	1.00	1.50
Contrainte nominale σ [MPa]	80	111	80	78	100	89
Réponse nominale r [mV/V]	1.9	2.7	1.9	1.9	2.4	2.1

Tableau 1. Dimensionnement préliminaire pour des forces allant de 10 à 400 N [1].

3. Fabrication

La procédure de fabrication comporte nominalement les étapes suivantes.

- 1) Fabrication du circuit hybride
- 2) Ajustement passif
- 3) Montage des composants
- 4) Collage du plot de mise en charge
- 5) Cassage du substrat – individualisation des pièces
- 6) Ajustement actif
- 7) Câblage

Pour ces prototypes, le collage du plot a été réalisé après ajustement, afin d'en caractériser l'effet (contraintes, cycle thermique de polymérisation) sur l'offset des capteurs.

Nous avons fabriqué des capteurs avec des épaisseurs de substrat de 0.4 (nos 0400...), 0.5 (0500), 0.635 (0635...) et 0.8 (0800...) mm d'épaisseur.

3.1. Fabrication du circuit hybride

Description

Le circuit est entièrement monoface. Le seul élément sérigraphié sur la face arrière est le diélectrique servant d'anneau externe. La liste des couches est donnée au tableau 2.

Diélectrique 1	ESL 4913	Face arrière, 2x, anneau ext. (a)
Conducteur 1	ESL 9635B (Ag:Pd 3:1)	Circuit, plages, terminaisons
Diélectrique 2	ESL 4913	Multicouche, 2x (b)
Conducteur 2	ESL 9635B (Ag:Pd 3:1)	Croisements, renfort plages
Résistances 100 Ohm	DuPont 2021	Ajustements (c)
Résistances 10 kOhm	DuPont 2041	Pont ; aj. offset grossier (c)
Diélectrique 3	ESL 4903	Anneau int., 2x (a)(c)(d)
Verrage	ESL G-481	580°C (e)

Tableau 2. Couches sérigraphiées.

Les conditions de cuisson sont standard : 850°C pour toutes les couches, sauf 580°C pour le verrage. En revanche, il y a quelques étapes critiques, et quelques problèmes ont aussi été notés :

- a) Le diélectrique ESL 4913 ne convient pas bien aux anneaux de mise en charge, car il est trop fragile : sollicité avec une pointe, il s'effrite et se décolle du substrat assez facilement.
- b) Ce diélectrique devrait ultérieurement être intégré au diélectrique 3, afin de diminuer le nombre d'étapes. Ici, on voulait pouvoir choisir séparément (voir note précédente).
- c) Les résistances ne devant être cuites qu'une seule fois (important car on a Ag:Pd et non Au comme terminaisons), on dépose et sèche les résistances, puis la 1^{ère} et la 2^e couche du diélectrique 3. Finalement, on cuit le tout ensemble à 850°C.
- d) Le diélectrique ESL 4903 est plus solide que ESL 4113, mais n'est pas entièrement exempt de problèmes : en application en couche épaisse, et surtout en deux couches cuites ensemble, il comporte beaucoup de bulles – on doit à terme trouver une solution...
- e) Le verrage est assez fragile, et on ne le sérigraphie donc pas sur l'anneau intérieur. D'autre part, la surépaisseur due à la distorsion de la trame par l'anneau est un peu gênante.

3.2. Ajustement passif

Après sérigraphie, le circuit est ajusté en passif.

- On ajuste d'abord les résistances $R_{base\pm}$ à 180 Ohm. Comme ces résistances et les $R_{gain\pm}$ forment une boucle, on utilise les calculs appropriés pour résoudre les valeurs [5].
- On mesure R_{gain1} (les $R_{gain2\dots5}$ sont nulles, vu que court-circuitées à ce stade).
- On ajuste R_{gain+} ou R_{gain-} pour avoir un gain initial de 100, de nouveau en utilisant des techniques d'ajustement de résistances en triangle [5].

Note. Normalement, on devrait effectuer ici l'ajustement discret grossier de l'offset, ce qui n'était pas possible (pas de mesure directe des sorties du pont sur la carte d'ajustement).

3.3. Montage des composants

Les composants électroniques à monter sont l'amplificateur (MicroChip 601) et les 4 condensateurs (les 3 du schéma [2] et un pour découpler l'alimentation). Ils sont montés en surface selon une procédure standard (sérigraphie de la brasure, montage et refusion).

3.4. Collage des plots

Le collage des plots en alumine (épaisseur 1.5 mm) a été réalisé avec de la colle silicone Dow Corning Q5-8401, polymérisée 1 h à 150°C.

Note. Pour cette série de prototypes, le collage a été réalisé après l'ajustement actif, pour tester la stabilité de l'offset.

3.5. Individualisation

Le substrat de 4" est cassé pour donner $6 * 6 = 36$ capteurs, d'empreinte $15.24 * 15.24$ mm².

3.6. Ajustement actif

Pour cette opération, les capteurs individuels sont placés sur un posage approprié.

Actuellement, l'ajustement actif commence par l'ajustement discret de l'offset (voir note dans la section "ajustement passif"), ce qui n'est pas optimal en raison de la saturation de l'amplificateur. On utilise essentiellement les ajustements no 2 et 3, selon le tableau 3.

No ajustement	seuil pour aj. +	seuil pour aj. -
1	saturation inférieure	pas utilisé
2	saturation inférieure	$0.88 * U_{alim}$
3	saturation inférieure	$0.40 * U_{alim}$

Tableau 3. Valeurs seuil pour l'ajustement discret de l'offset.
Saturation inférieure = 20 mV. $U_{alim} = 5.00$ V.

Ensuite, l'offset est ajusté analogiquement pour être dans $(0.03...0.12) * U_{alim}$.

Le gain est ensuite configuré en coupant les courts-circuits de R_{gain} . Dans notre cas, nous avons fabriqué des capteurs de gain nominal 100, 200, 300 et 400.

- Nos 0800/ 1...10 ; 0400... ; 0500... ; 0635... : gain = 400. Activation de R_{gain2} et R_{gain3} .
- Nos 0800/11...20 : gain = 300. Activation de R_{gain3} .
- Nos 0800/21...30 : gain = 200. Activation de R_{gain2} .
- Nos 0800/31...36 : gain = 100.

Finalement, l'offset est ajusté à $0.10 * U_{alim}$, c'est-à-dire 0.500 V.

4. Résultats

4.1. Valeurs des résistances

Les valeurs brutes de fabrication sont données aux tableaux 4 à 6 ci-après, y compris les résistances parasites des pistes. Noter que, pour l'ajustement grossier, une solution mixte a été choisie pour optimiser le layout : une résistance (R5), la plus grande en surface, est utilisable en positif et en négatif à la manière de la membrane de SH200, alors que les autres ajustements grossiers utilisent des résistances séparées pour le positif et le négatif.

Résistance (position : layout fig. 2)	Valeur [Ohm]	Note
R4- (centre haut, 1-, branche s-)	17'070	
R1- (centre bas, 2-, branche s+)	15'990	
R2+ (droite, 2+, passive, branche s+)	16'475	
R3+ (bas, 1+, passive, branche s-)	16'695	
R7- (milieu-haut, aj. grossier G1-)	2'190	$\Delta\text{offset} : -33.1 \text{ mV/V}$
R7+ (droite, aj. grossier G1+)	2'195	$\Delta\text{offset} : +33.2 \text{ mV/V}$
R6- (milieu-haut, aj. grossier G2-)	975	$\Delta\text{offset} : -14.7 \text{ mV/V}$
R6+ (bas, aj. grossier G2+)	950	$\Delta\text{offset} : +14.3 \text{ mV/V}$
R5 (haut, aj. grossier G3±)	363	$\Delta\text{offset} : \pm 5.5 \text{ mV/V}$
R _{gain1} (gain, valeur de base)	2'620	
R _{gain2} (gain, activable, "1")	2'630	$= 1.00 * R_{\text{gain1}}$
R _{gain3} (gain, activable, "2")	5'295	$= 2.02 * R_{\text{gain1}}$
R _{gain4} (gain, activable, "4")	9'395	$= 3.59 * R_{\text{gain1}}$
R _{gain5} (gain, activable, "8")	17'905	$= 6.84 * R_{\text{gain1}}$

Tableau 4. Valeurs brutes des résistances DuPont 2041 (composition 10 kOhm).

Résistance (position : layout fig. 2)	Valeur [Ohm]	Note
R _{base-} (droite, branche s-)	152	Niveau initial : 4.38 mV/V
R _{base+} (droite, plus bas, branche s+)	151	Niveau initial : 4.47 mV/V
R _{offset-} (à gauche de R _{offset+})	140	
R _{offset+} (coin haut droite)	140	
R _{gain-} (à gauche de R _{gain+})	297	
R _{gain+} (droite, bas)	50	
R _{sortie}	135	Pas critique, non ajusté

Tableau 5. Valeurs brutes des résistances DuPont 2021 (composition 100 Ohm).

Résistance	Valeur [Ohm]	Note
Contact de masse	2.4	Plage GND ... jonction entre les $R_{base\pm}$
Contact base+	0.0	Plage base+ ... jonction R_{base+} / R_{gain-}
Contact base-	0.2	Plage base- ... jonction R_{base-} / R_{gain+}
Contact gain	0.4	Plage fin de $R_{gain1...5}$... jonction entre les $R_{gain\pm}$

Tableau 6. Résistances parasites des pistes (approximatives).

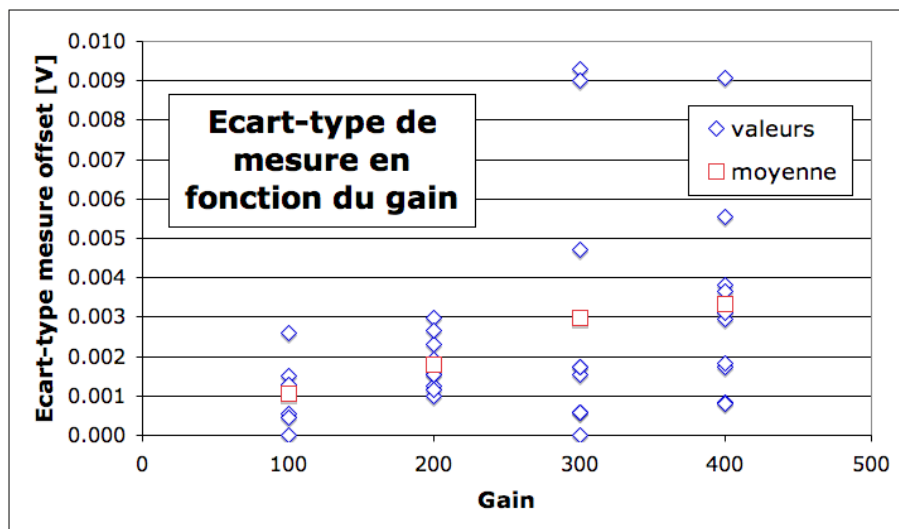
Les valeurs mesurées sont en général satisfaisantes, avec toutefois quelques changements souhaitables.

- Les offsets observés sont dans une fourchette de ± 30 mV/V, ce qui est assez bon.
- L'échelonnement des résistances d'ajustement grossier ($G1 / G2 \approx 2.3$; $G2 / G3 \approx 2.7$) est assez bon. Il faudrait légèrement augmenter $G1 / G2$.
- Ces résistances d'ajustement sont légèrement trop grandes en valeur. Idéalement, il faudrait environ $G1, G2, G3 = 29, 11, 4$ mV/V respectivement, ce qui est plus confortable ensuite pour l'ajustement analogique.
- Les résistances d'ajustement analogique donnent satisfaction.
- Le gain calculé (non ajusté) est de l'ordre de 90. L'échelonnement de R_{gain} (aj. discret) devrait être ajusté pour obtenir les rapports 1, 2, 4 et 8 par rapport à R_{gain1} .

4.2. Dispersion de mesure et effet de la carte d'ajustement

La dispersion de mesure de l'offset est donnée à la figure 3, en fonction du gain nominal, pour le substrat d'épaisseur nominale 0.8 mm (h mesuré = 0.76 mm). Elle est environ proportionnelle au gain, et le bruit de l'amplificateur MicroChip 601 en est probablement la cause principale.

L'effet sur l'offset des contraintes amenées par la carte d'ajustement est faible, comme le montre la figure 4 ($h = 0.4$ et 0.635 mm). Pour une course du prober nettement exagérée, un effet appréciable n'est observé que pour une épaisseur de 0.4 mm.

Figure 3. Dispersion de mesure de l'offset en fonction du gain nominal ($h = 0.76$ mm).

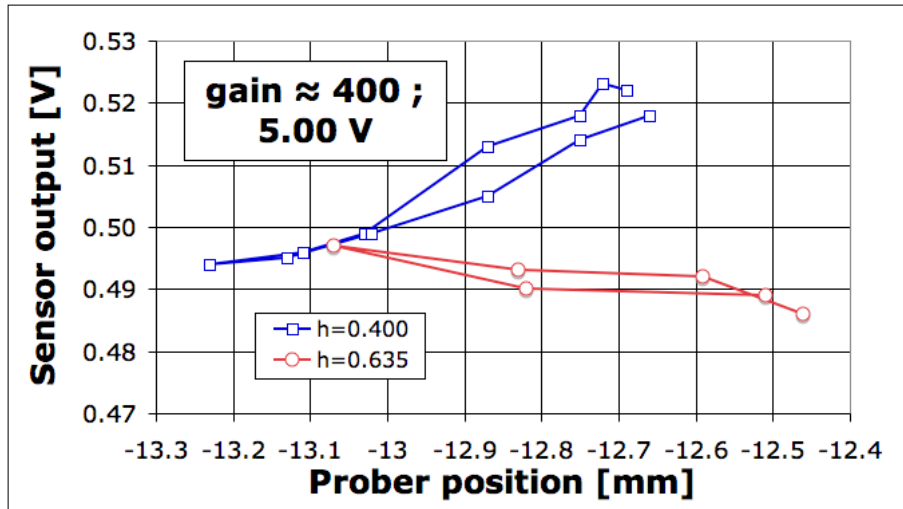


Figure 4. Effet de la position du prober (support de la carte) sur le signal de sortie, pour deux épaisseurs.

4.3. Offset après ajustement

La distribution des offsets après ajustement est donnée à la figure 5, en fonction du gain nominal. On observe une augmentation progressive prévisible de la dispersion pour de grands gains.

Pour ce produit très low-cost, ces valeurs sont acceptables, d'autant plus qu'une partie de la dispersion est due à celle de mesure (voir ci-dessus), et que quelques facteurs ne sont pas encore optimaux.

- L'ajustement grossier discret de l'offset doit être amélioré (voir chapitre 3).
- L'amplificateur MicroChip 601 est un modèle très basse consommation, mais présente un bruit important, problème déjà constaté avec le SH200. Il devrait être possible de trouver une meilleure alternative.

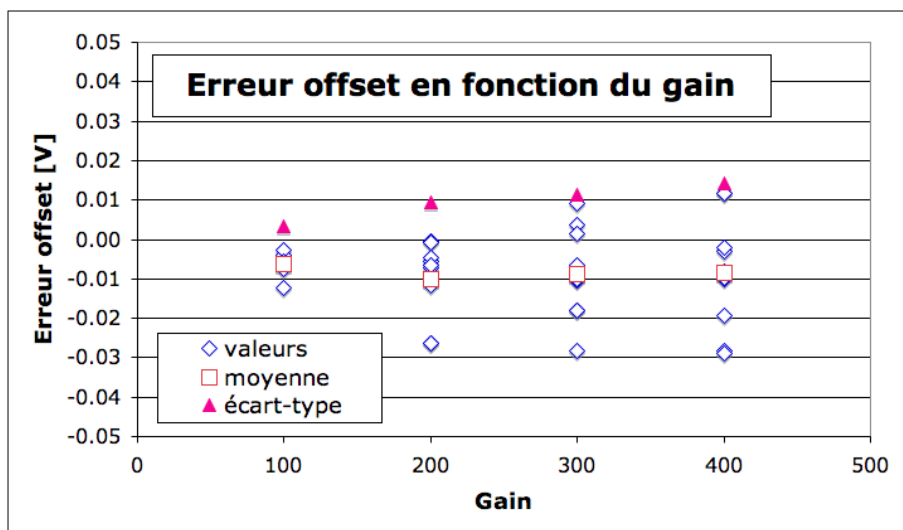


Figure 5. Erreur de l'offset (valeur nominale : 0.500 V) en fonction du gain nominal ($h = 0.76$ mm).

4.4. Variation de l'offset au collage des plots en céramique

Dans cette série, les plots ont été collés après ajustement actif, afin d'en caractériser l'effet (traitement thermique ou contraintes) sur l'offset. Les résultats (mêmes échantillons qu'aux figures 3 et 5) sont donnés à la figure 6. Là aussi, la dispersion tend à augmenter avec le gain, ce qui ne permet pas de différencier les contraintes des traitements thermiques. Le traitement thermique est cependant la cause la plus probable, car la colle silicone est relativement tendre et le substrat est ici épais.

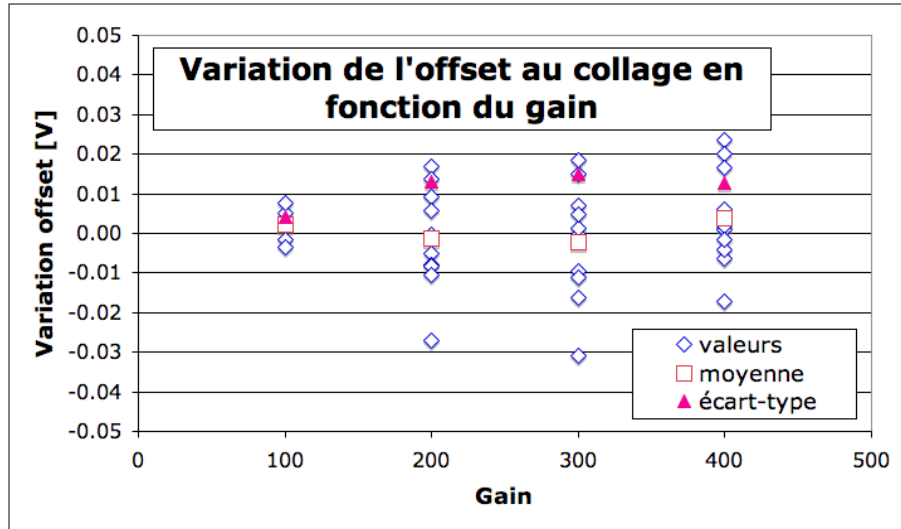


Figure 6. Variation de l'offset au collage en fonction du gain nominal ($h = 0.76$ mm).

4.5. Mise en charge

Quelques essais de mise en charge ont été réalisés, avec la presse Promess du LPM. Des résultats sont donnés pour deux échantillons ($h = 0.50$ mm) à la figure 7 [1].

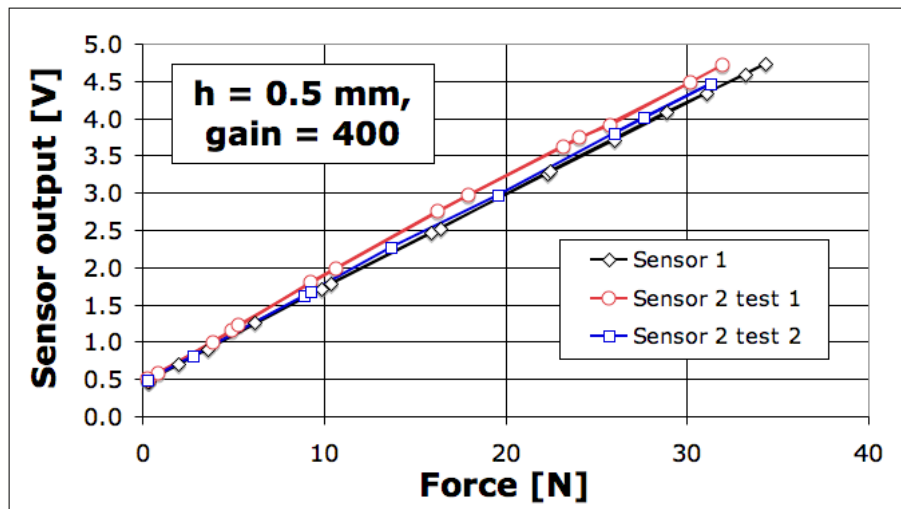


Figure 7. Mesures sous charge [1] de deux capteurs ($U_{\text{alim}} = 5.00$ V).

Les résultats sont assez homogènes. Comme on peut l'attendre, le fait que les conditions aux bords ne sont pas très bien définies (position de la force sur le plot de céramique et distribution des forces sur l'anneau externe) donne pour le même capteur des sensibilités légèrement différentes d'un test à l'autre.

En revanche, on n'observe guère d'hystérèse liée à des phénomènes de friction, alors qu'une hystérèse de quelques % serait normale pour ce genre de capteur.

5. Conclusions

Le concept CentoNewton semble être une solution viable pour la mesure low-cost de forces de l'ordre de grandeur de 100 N. Cependant, quelques modifications sont souhaitables.

- Le **collage des plots** doit intervenir après le montage des composants.
- L'**Ajustement grossier discret de l'offset** doit faire partie de l'ajustement passif initial, réalisé en substrat avant le montage des composants et le collage des plots. De plus, les résistances correspondantes doivent être légèrement redimensionnées.
- Les composantes de la **résistance de gain** doivent être revues, afin de se rapprocher des proportions 1 : 1 : 2 : 4 : 8.
- Les **conditions aux bords** doivent être mieux définies. Pour cela, il conviendrait de caractériser l'influence de la distribution des forces sur l'anneau extérieur et de la position du point d'application de la force sur le plot supérieur. Eventuellement, il serait possible de coller le capteur sur un support plan et de modifier le plot pour mieux centrer la force.

6. Références

- [1] Maeder-T Saglini-I Corradini-G Ryser-P, "Low-cost thick-film force sensors for the 100 N force range", Proceedings, XXX International Conference of IMAPS Poland, Cracow, accepted, 2006.
- [2] Maeder-T, "Électronique modulaire v2 – schéma et calculs", rapport LPM, 2005.
- [3] Vionnet-S Maeder-T Ryser-P, "Firing, quenching and annealing studies on thick-film resistors", Journal of the European Ceramic Society 24 (6), 1889-1892, 2004.
- [4] Maeder-T Jacq-C Corradini-G Ryser-P, "Effect of thick-film materials on the mechanical integrity of high-strength ceramic substrates", Proceedings of the 15th European Microelectronics and Packaging Conference (EMPC), Brugge (BE), IMAPS, S16.03, 377-381, 2005.
- [5] Maeder-T, "Ajustement de résistances en triangle", rapport LPM, 2003.