

## Ajustement des capteurs MilliNewton, 2<sup>e</sup> version.

*Ajustement et stabilité de la 2<sup>e</sup> version des capteurs de force MilliNewton amplifiés.*

*Abgleich und Stabilität der 2. Version des verstärkten MilliNewton-Kraftsensoren.*

Thomas Maeder, 11.6.2001

**Projets:** MilliNewton, TEPLAZID-ajustement.

**Mots-Clefs:** offset, span, MilliNewton, ajustement capteurs, TCO, stabilité.

### Table des matières

1. Introduction .....	2
2. Expériences .....	3
3. Ajustement des embases.....	6
4. Ajustement des capteurs .....	8
5. Stabilité au montage des pattes de sortie.....	11
6. Conclusions .....	12

### Résumé

La 2<sup>e</sup> version de la poutre et de l'embase MilliNewton permettent la fabrication de capteurs nettement plus stables, ainsi qu'un ajustement plus précis. Le montage des pattes de sortie SIL reste problématique, l'altération résultante de l'ajustement étant encore quelque peu trop grande. La cause la plus probable d'instabilité lors de cette opération est l'ajustement passif des résistances, notamment celui des résistances à haute valeur constituant le numérateur du gain de l'électronique d'amplification.

### Kurzfassung

Die 2. Version des MilliNewton – Biegebalkens und – Unterlage erlauben die Herstellung stabilerer Sensoren und einen genaueren Abgleich. Die Montage der SIL–Kontakte bleibt problematisch, da die resultierende Änderungen der abgeglichenen Kennwerte noch etwas zu gross ist. Die wahrscheinlichste Ursache dieser Instabilität besteht im Passivabgleich der Widerstände, besonders der Hochohmigen, die den Gain-Numerator des Verstärkers bestimmen.

## 1. Introduction

L'ajustement et la stabilité de la 1<sup>ère</sup> version du capteur de force MilliNewton posait plusieurs problèmes<sup>1</sup>. Plusieurs modifications ont été réalisées pour la 2<sup>e</sup> version, afin d'en faciliter la production, l'ajustement et d'en améliorer la stabilité. Une partie de ces modifications (taille des résistances) sont visibles à la fig. 1–1, où les deux versions sont comparées.

### Poutre

- Ajustement de l'offset grossier réalisé sur la poutre, et stabilisé ultérieurement par verrage et / ou recuit.
- Impédance du pont de mesure abaissée de 20 k $\Omega$  à env. 5 k $\Omega$ , ce qui augmente l'immunité contre le bruit du pont de mesure tout en restant dans les spécifications concernant la consommation.
- Utilisation de l'or fin comme terminaisons au lieu de Ag:Pd, ce qui devrait diminuer la dispersion du coefficient en température de l'offset (*TCO*).
- Sérigraphie avec le même masque, sans démontage, des résistances du pont de mesure (DP 2041, 10 k $\Omega$ ) sur les deux faces, ce qui améliore la reproductibilité de l'offset<sup>2</sup>. L'aire des résistances a aussi été augmentée. Les résistances d'ajustement grossier de l'offset (DP 2031, 1 k $\Omega$ ) sont sérigraphiées à part.
- Cuisson selon une procédure bien définie, donnant des valeurs d'offset et de *TCO* reproductibles.

### Embase

- Augmentation de la taille des résistances d'ajustement de l'offset, du *TCO*, et du gain, ce qui facilite les ajustements nécessitant plusieurs coupes dans la même résistance, et en augmente la stabilité.
- Introduction de couches sacrificielles pour fixer la distance entre la poutre et l'embase.

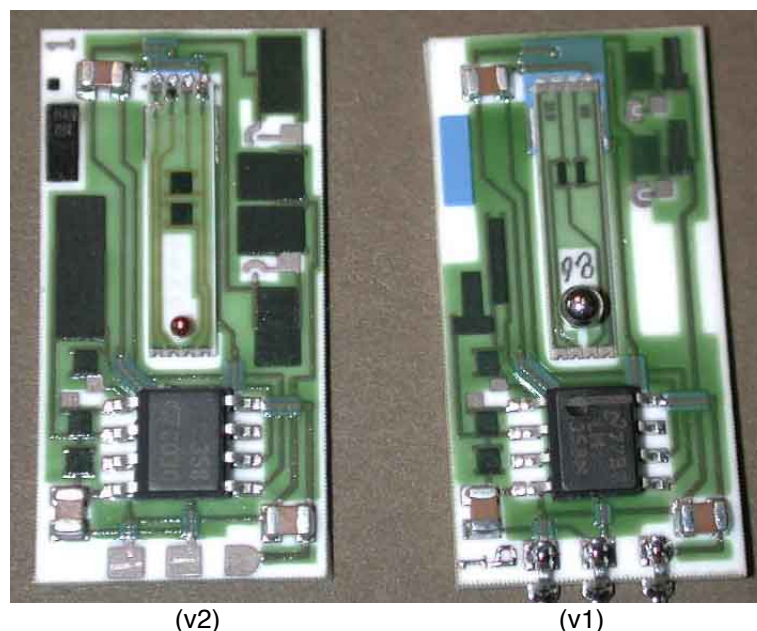


Fig. 1–1. Comparaison des versions 2 (gauche) et 1 (droite) du capteur MilliNewton.

<sup>1</sup> Rapport "Ajustement des capteurs MilliNewton, 1<sup>e</sup> version", T. Maeder, 20.4.2001.

<sup>2</sup> Rapport "Offset non ajusté des poutres MilliNewton, version 2", T. Maeder, 17.4.2001.

## 2. Expériences

### **Substrats et circuits**

Le produit Sensile MilliNewton utilise deux types de circuits (photos aux figures 2-1, 2-2 et 2-3).

- 1) **La poutre** (épaisseur 0.25 mm, mais aussi 0.40 et 0.63 mm), qui contient le pont de mesure, ainsi que des résistances d'ajustement grossier de l'offset. Contrairement à la version précédente, l'ajustement grossier sur la poutre est fonctionnel, et a été réalisé en substrat, puis stabilisé par verrage<sup>3</sup>.
- 2) **L'embase** (épaisseur 1.0 mm) qui sert de support mécanique et contient l'électronique d'amplification. Sur les 3 circuits d'amplifications présents sur le substrats ("DT400", "Kolbasi 1" et "Kolbasi 2"), seul "DT400" est utilisé ici. Comme son nom l'indique, il correspond au circuit utilisé pour l'amplification du capteur DT400 de Huba Control AG.

Dans la version actuelle du produit, la poutre est brasée sur l'embase en utilisant une brasure eutectique 96.5% Sn – 3.5% Ag (alliage Sn96). Les deux substrats sont en alumine 96% standard.

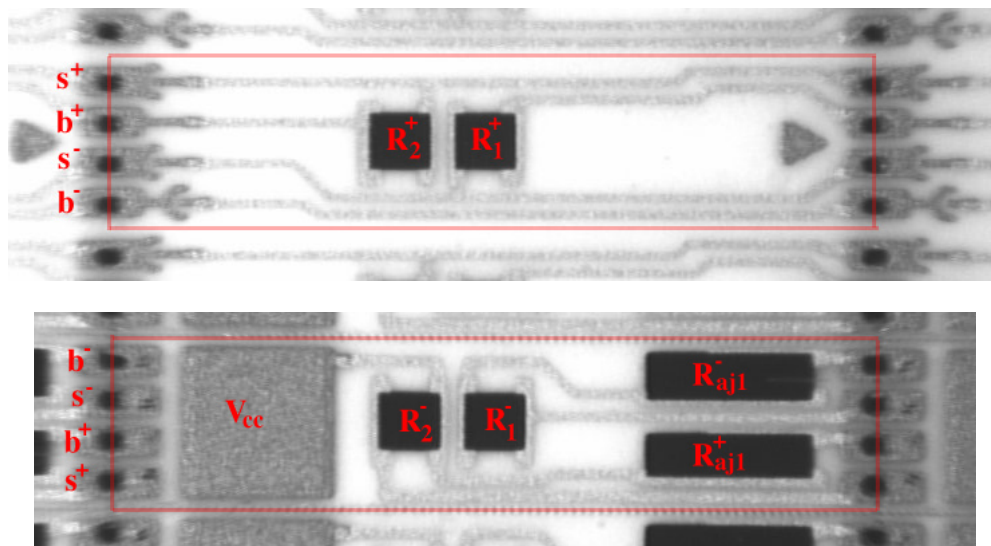


Figure 2-1. Poutre MilliNewton, version 2 (face supérieure en haut, face inférieure en bas). La poutre mesure env. 13 x 3 mm, avec une longueur effective de 8 mm pour le moment de flexion.

<sup>3</sup> Rapport "Ajustement et verrage des poutres MilliNewton, version 2", T. Maeder, 5.6.2001.

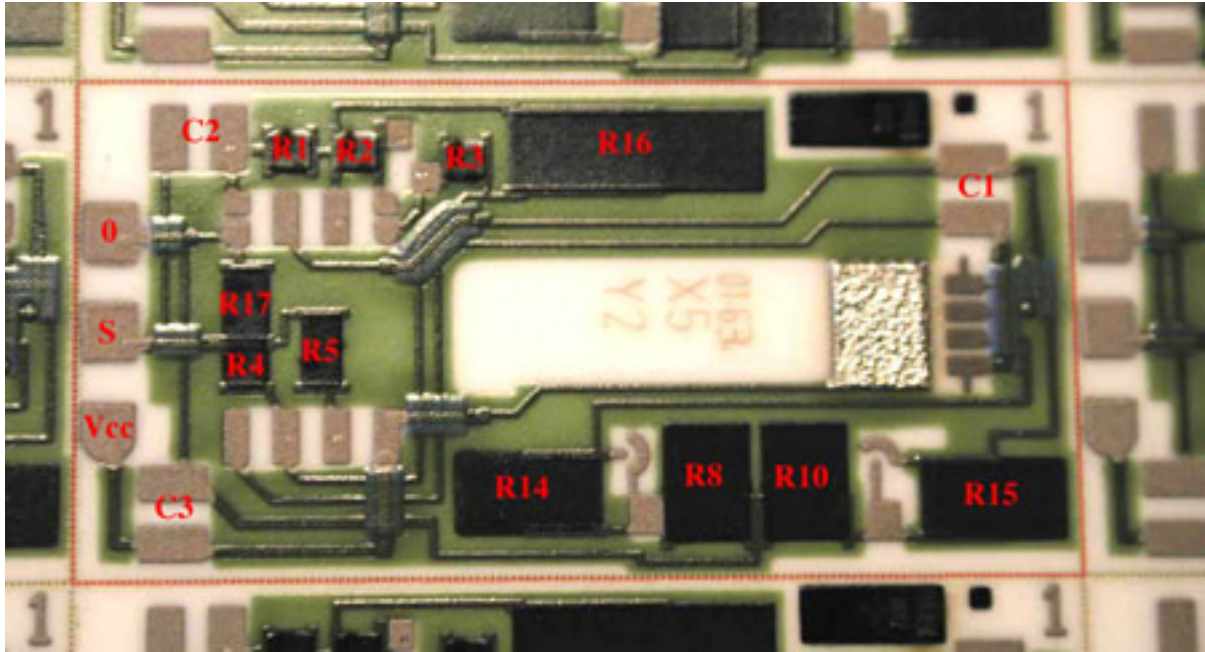


Figure 2-2. Embase de type "DT400".

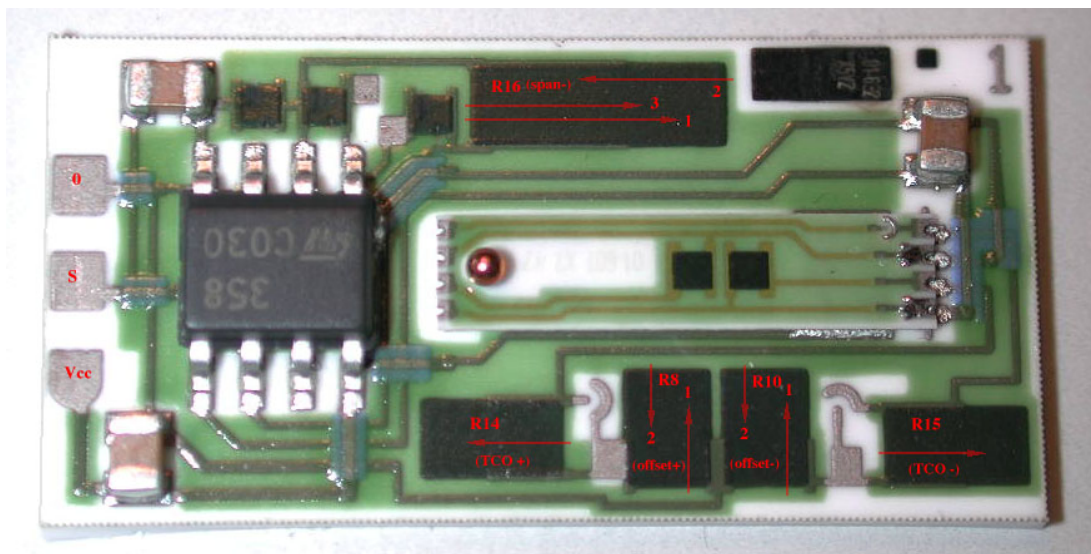


Figure 2-3. Capteur complet, avec embase de type "DT400" et schéma d'ajustement actif.

## Pâtes de sérigraphie

Les pâtes de sérigraphie utilisées pour la poutre et l'embase sont données ci-dessous.

### Embase

- Conducteurs, terminaisons des résistances et plages de sortie / report : ESL 9635B (Ag:Pd 3:1).
- Diélectrique multicouches : ESL 4913.
- Ajustement de l'offset fin et du gain (DT 400) : DP 2021 (100  $\Omega$ ).
- Ajustement du *TCO* : ESL 2612 (env. 100 $\Omega$  et 2'300 ppm/K).
- Résistances ajustées en passif (circuit d'amplification) : DP 2021 (100  $\Omega$ ), DP 2041 (10 k $\Omega$ ) et DP 2051 (100 k $\Omega$ ).
- Verrage : ESL G-481.
- Report de la poutre et des composants : Sn-Ag (cette étude), Sn-Pb-Ag ou colle conductrice, à définir.
- Couche sacrificielle pour fixer la distance poutre – embase : à définir.

### Poutre

- Métallisation des trous et plages de report : ESL 9635B (Ag:Pd 3:1).
- Conducteurs et terminaisons des résistances : ESL 8837 (Au fin).
- Résistances de jauge : DP 2041 (10 k $\Omega$ ).
- Résistances d'ajustement grossier de l'offset : DP 2031 (1 k $\Omega$ ).
- Verrage : ESL G-481.

## Ajustement

La variante de MilliNewton testée ici (poutres de 0.25 mm d'épaisseur) est ajustée pour une force nominale de 400 mN<sup>4</sup>. Pour une tension alimentation  $V_{cc}$  de 5 V, le capteur doit donner 0.5 V ( $0.1 \cdot V_{cc}$ ) pour 0 mN et 3.5 V ( $0.7 \cdot V_{cc}$ ) pour 400 mN. Le capteur est théoriquement ratiométrique, mais l'offset varie quelque peu en fonction de la tension d'alimentation, fait dû à la non ratiométrie de l'offset des deux amplificateurs opérationnels utilisés (1 amplificateur double LM358).

Sur les embases (les "DT400", schéma à la fig. 2-4), on réalise d'abord en batch (en substrat) l'ajustement passif des résistances R1-R5 et R17. Les valeurs nominales de toutes les résistances (v. fig. 2-2) sont données, avec les autres composants, au tableau 2-I. Les résistances basées sur DP 2051 (composition plus difficile à ajuster) sont ajustées en deux temps : un ajustement à env. -2% de la valeur nominale, puis une "correction".

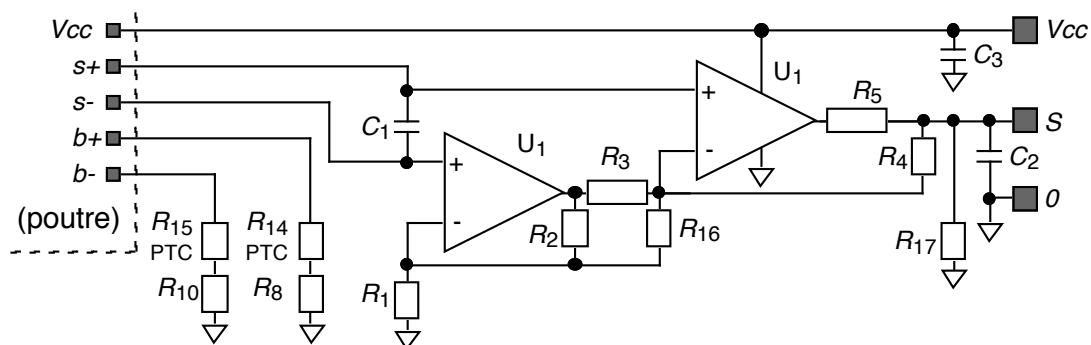


Fig. 2-4. Schéma de l'électronique d'amplification "DT400".

<sup>4</sup> Fiche technique "MilliNewton generic force cell", Sensile Technologies SA.

Résistance ou composant	Valeur (ajustée)	Composition ou référence
R1, R4	100 k $\Omega$ $\pm$ 1%	DP 2051
R2, R3	10 k $\Omega$ $\pm$ 1%	DP 2041
R5	200 $\Omega$ $\pm$ 1%	DP 2021
R17	200 k $\Omega$ $\pm$ 1%	DP 2051
R8, R10	(aj. actif)	DP 2021
R14, R15	(aj. actif)	ESL 2612
C1, C2	10 nF	(céramique)
C3	47 nF	(céramique)
U1	-	LM 358

Tableau 2–I. Liste des résistances et composants. Les spécifications sur la précision de l'ajustement passif sont celles de Huba Control.

Les capteurs sont ajustés en batch, mais pas en substrat : le substrat des embases est divisé par cassage et les capteurs individuels sont placés dans un posage d'une contenance de 15 pièces. Ce montage et la procédure d'ajustement sont identiques à ceux utilisés pour l'ajustement de la version 1<sup>1</sup>. En revanche, l'ajustement de l'offset est rendu nettement plus facile du fait que l'offset a auparavant été ajusté grossièrement sur la poutre. De plus, la taille plus importante des résistances d'ajustement actif permet un ajustement plus précis et plus stable ; avec des poutres fonctionnelles, on n'a notamment plus de problème à ajuster l'offset.

Les problèmes de bruit de mesure s'étant avérés moins importants que prévu, l'asservissement des coupes a été quelque peu "relaxé" par rapport à la version 1, afin de gagner en vitesse.

- Les coupes grossières sont réalisées en utilisant directement les comparateurs du multimètre.
- Les coupes fines sont encore réalisées en pas à pas, mais avec un temps de mesure réduit à 20 ms.

### **Pattes de sortie SIL**

Après ajustement, des pattes de sortie SIL (*single in-line*) ont été montées par trempage dans un bain de brasure Pb–Sn à env. 240°C. Le décapant est ensuite enlevé par nettoyage aux ultrasons dans de l'alcool. Après ces opérations, l'offset et le span des capteurs ont ensuite été remesurés, afin de vérifier la stabilité de l'ajustement lors de ces opérations altérant potentiellement les résistances ajustées.

## **3. Ajustement passif des embases**

Les histogrammes des écarts des résistances sur l'embase par rapport à leur valeur nominale sont donnés aux figures 3–1 (à l'état non ajusté) et 3–2 (à l'état ajusté).

La sérigraphie de la pâte DP 2021 est satisfaisante. En revanche, celle de DP 2051 et surtout celle de DP 2041 donnent des valeurs quelque peu trop faibles (sérigraphie trop épaisse) ; idéalement, on vise env. –30%, afin d'éviter des ajustements trop poussés (source d'imprécision et d'instabilité) tout en évitant de dépasser la valeur nominale.

L'ajustement des résistances basées sur DP 2021 et DP 2041 se fait sans problème. Ce n'est pas le cas de DP 2051 ; malgré leur ajustement en deux temps, la dispersion des valeurs est encore trop importante.

Avec la procédure actuelle d'ajustement, où le span est ajusté dans une première phase à env. +6% du span final, ces imprécisions ne portent en principe pas à conséquence, car l'ajustement final entraîne des modifications très réduites. En revanche, pour une version plus "industrielle" où le span serait ajusté en une fois, l'ajustement de ces résistances doit être amélioré.

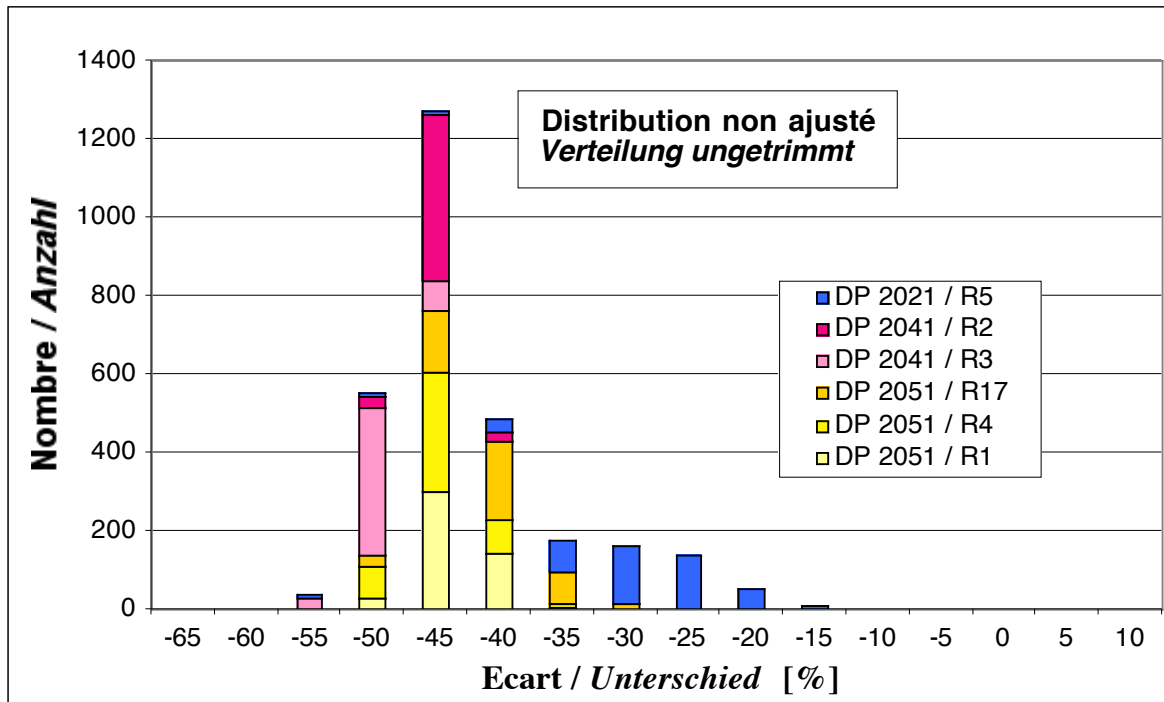


Fig. 3–1. Histogramme des écarts des résistances par rapport à leurs valeurs nominales, avant ajustement.

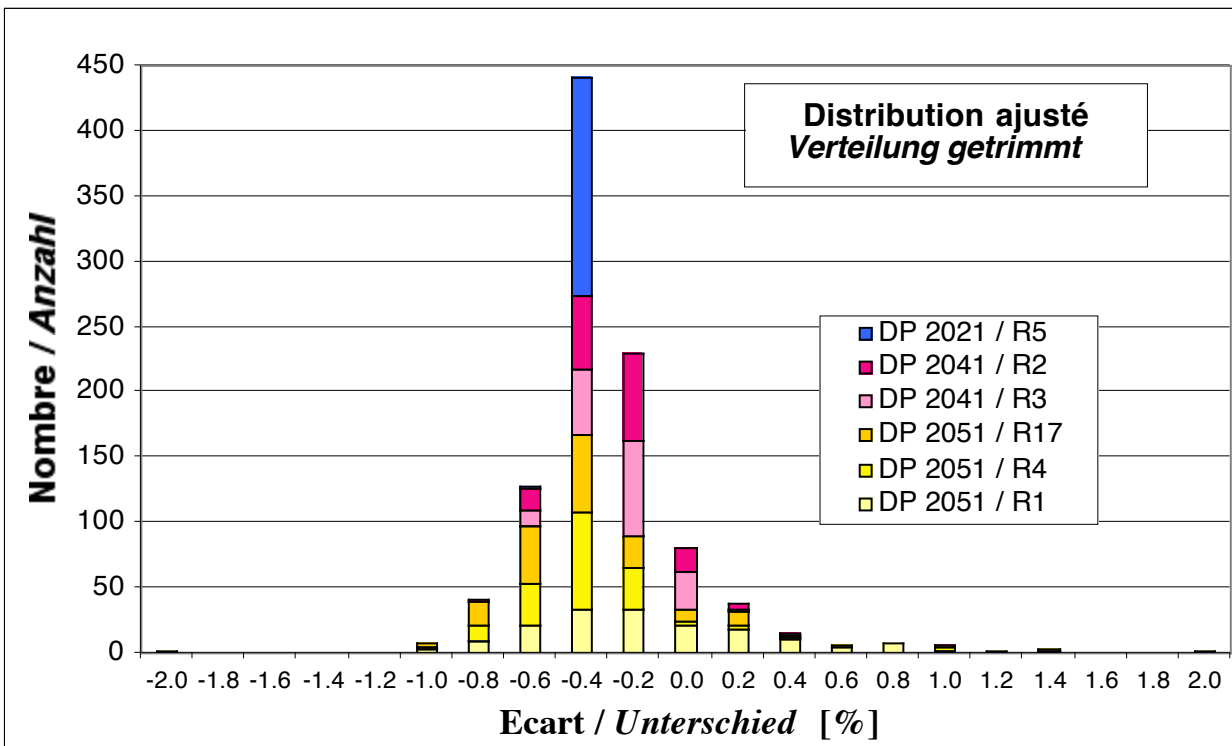


Fig. 3–2. Histogramme des écarts des résistances par rapport à leurs valeurs nominales, après ajustement.



## 4. Ajustement des capteurs

### 4.1. Offset et span

L'histogramme des erreurs d'ajustement en offset et en span est donné à la fig. 4–1. Les mesures sont prises ici moins d'une heure après ajustement, sans soumettre le capteur à une autre sollicitation que celle nécessaire à la mesure du span.

- L'ajustement de l'offset est très bon; tous les capteurs sont au moins 2x meilleurs que les spécifications ( $\pm 1\%$  du span).
- L'ajustement du span est centré un peu trop haut (vers  $+0.2$  à  $+0.3\%$ ). De plus, quelques capteurs ont des valeurs de span nettement trop élevées (env.  $+5\%$ ). Après vérifications, il s'avère que le gain initial est tellement important que son ajustement peut entraîner la saturation négative de l'offset (env.  $0.06$  V pour LM358) d'où erreur sur le calcul du gain. Dans le futur, ce problème sera résolu en ajustant l'offset à une valeur plus élevée avant le premier ajustement du gain.

Moyennant de petites modifications sur l'ajustement du span, on peut qualifier la qualité de l'ajustement de satisfaisante. La prochaine étape sera d'en augmenter la vitesse.

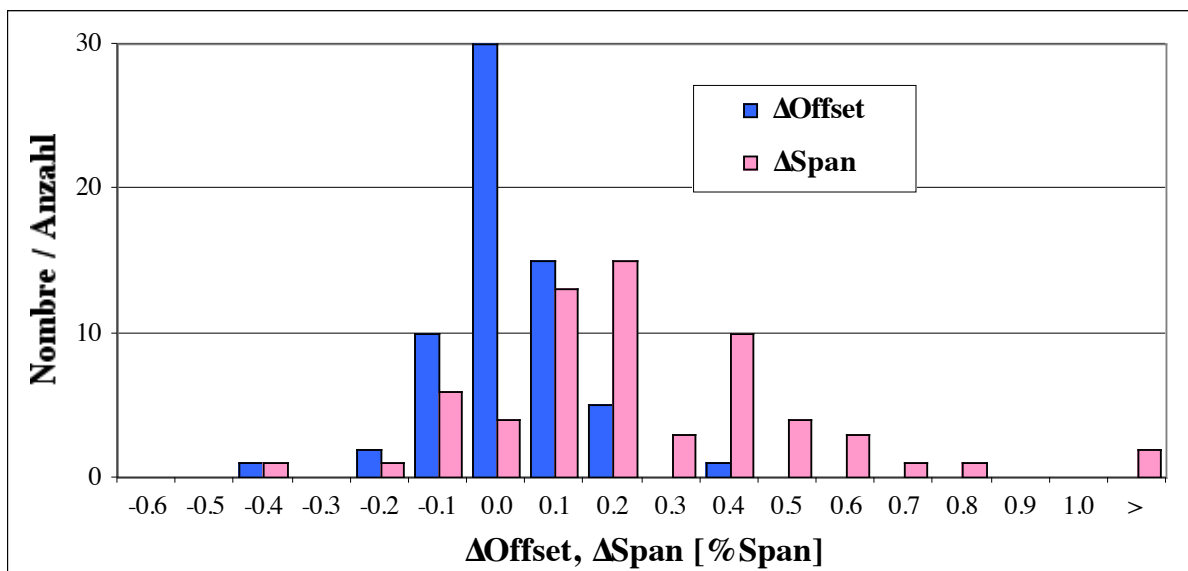


Figure 4–1. Histogramme des erreurs d'ajustement des capteurs, en offset et en span. Capteurs no 6100 à 6164.



#### 4.2. Coefficient en température de l'offset TCO

La distribution des *TCO* est donnée, à l'état brut et ajusté, à la fig. 4–2. Le *TCO* non ajusté est rapporté au span final, afin d'être comparable au *TCO* ajusté. Par rapport à la version précédente<sup>1</sup>, les améliorations sont flagrantes, tant à l'état ajusté que non ajusté. A part quelques erreurs dues vraisemblablement à des problèmes de posage ou de poutres (il subsiste avec ces poutres des problèmes avec les ponts de brasure), tous les capteurs sont dans les spécifications ( $\pm 0.05\%$  ;  $\pm 0.02\%$  typ.).

Le *TCO* ajusté est légèrement positif alors qu'il est plutôt négatif avant ajustement ; il est donc légèrement sur-ajusté. Il faudra donc augmenter légèrement le coefficient en température  $TCR_{PTC}$  des résistances d'ajustement du *TCO* pris comme base de calcul (valeur utilisée ici :  $+2'100$  ppm/K).

Ramenés à la poutre, la moyenne et l'écart-type du *TCO* non ajusté correspondent à env.  $-0.8 \pm 0.3 \mu\text{V/V/K}$ , ce qui est déjà excellent et laisse envisager la commercialisation si besoin est de versions à bas coût non ajustées en température. Ce faible *TCO* indique que l'aération des résistances inférieures lors de la cuisson est maintenant bien maîtrisée.

La fig. 4–3 donne l'évolution en température de 10 capteurs entre température ambiante et  $80^\circ\text{C}$ , par intervalles de  $10^\circ\text{C}$ . Hormis un capteur mal ajusté, tous conservent une erreur de  $<1\%$  jusqu'à  $80^\circ\text{C}$ . La linéarité est dans tous les cas meilleure que  $0.5\%$ . Quant à la stabilité (évolution lors de ce cycle thermique) elle est de l'ordre de  $0.2\%$ .

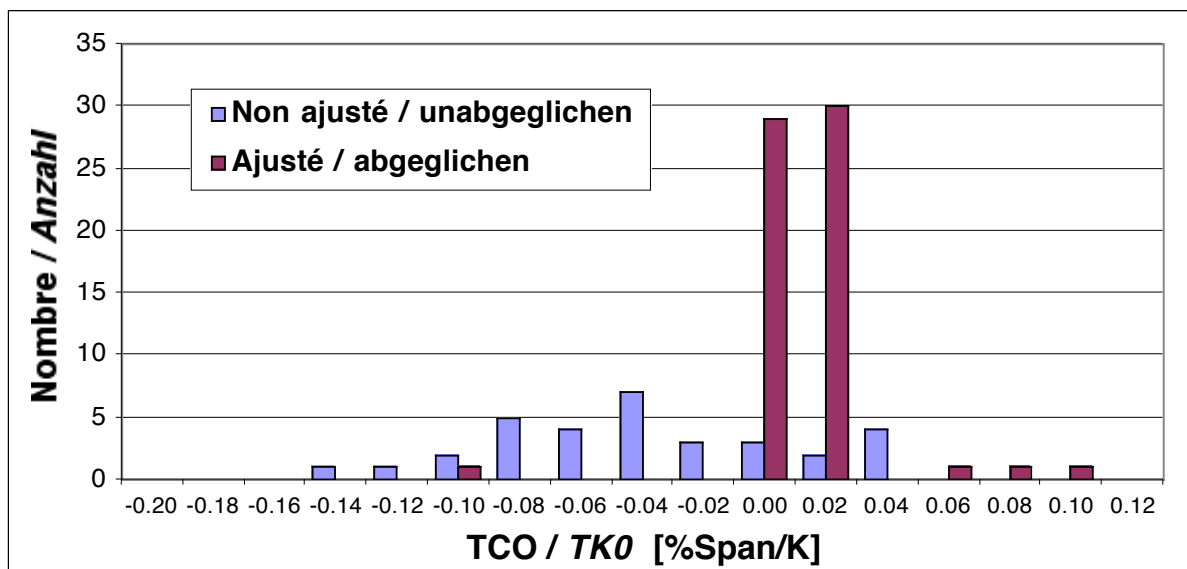


Figure 4–2. Histogramme des coefficients en température de l'offset à l'état non ajusté et ajusté.  
Moyenne  $\pm$  écart-type [%span/K] :  $-0.03 \pm 0.06$  (non ajusté) et  $+0.01 \pm 0.02$  (ajusté).  
Capteurs no 6100 à 6164.

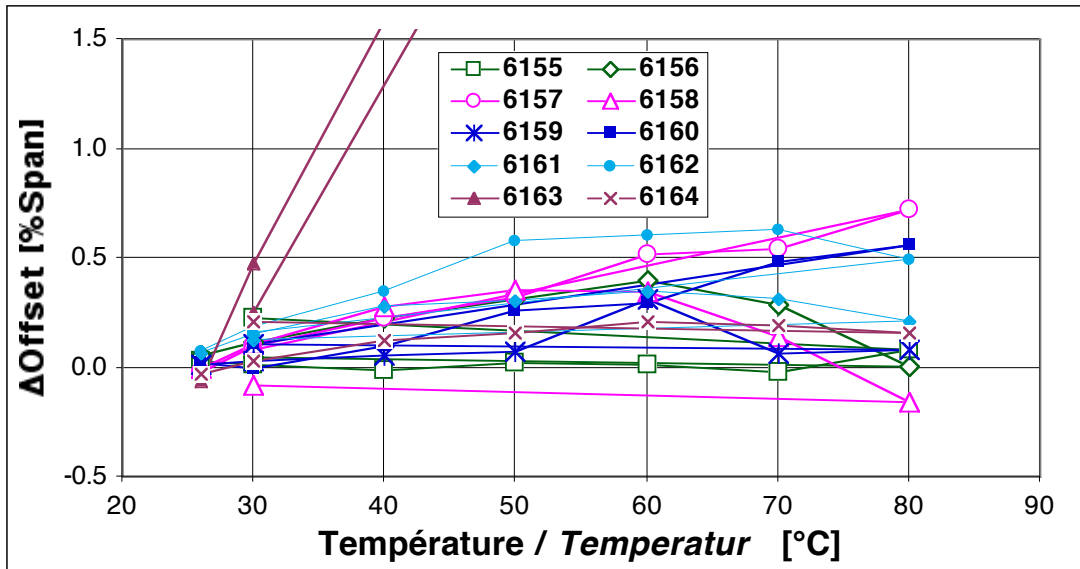


Figure 4-3. Offset de 10 capteurs (no 6155 à 6164) en fonction de la température.

### 4.3. Coefficient en température du span TCS

La valeur du coefficient en température du span TCS est donnée par l'évolution en température des propriétés physiques des résistances et du substrat, et n'est pas ajustée pour ce produit. La distribution de TCS, donnée à la fig. 4-4, est assez étroite (écart-type  $\pm 0.01\%/K$ ). En moyenne, le span (la sensibilité du capteur) diminue d'env.  $0.04\%/K$ .

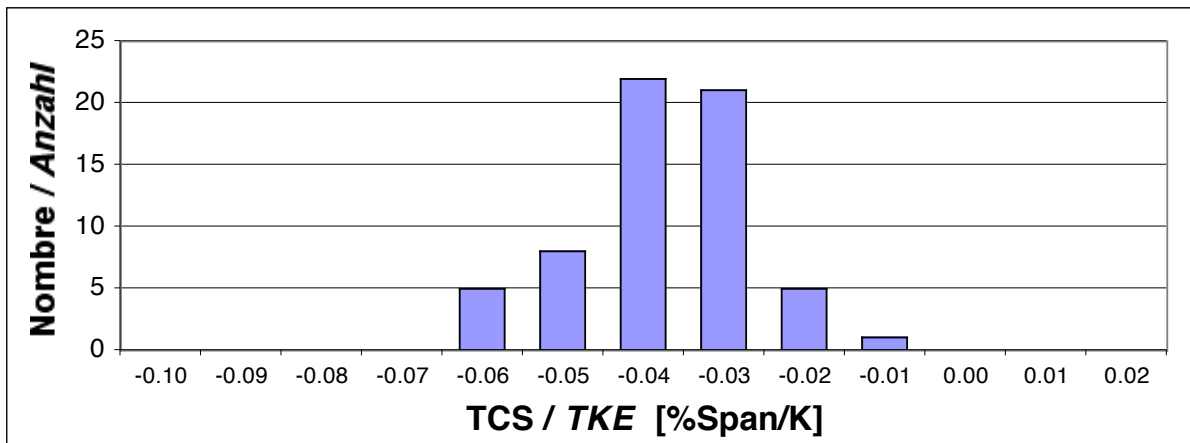


Figure 4-4. Histogramme des coefficients en température du span (non ajusté).  
 Moyenne  $\pm$  écart-type [%span/K] :  $-0.04 \pm 0.01$ .  
 Capteurs no 6100 à 6164.

## 5. Stabilité au montage des pattes de sortie

L'histogramme des erreurs d'ajustement en offset et en span, après montage des pattes de sortie SIL, est donné à la fig. 5–1. Par rapport aux résultats après ajustement (fig. 4–1), la distribution s'est considérablement élargie et, notamment en span, une bonne partie des capteurs sort désormais des tolérances.

Le fait que le span soit plus affecté que l'offset par les contraintes induites lors du trempage et du passage aux ultrasons laisse supposer que c'est l'ajustement des résistances, et notamment l'ajustement passif du circuit "DT400" (R1, R2, R3 et R4) qui est à la source de cette instabilité, et non la brasure de la poutre sur l'embase.

- L'évolution des contraintes dans la brasure ne devrait essentiellement altérer que l'offset. Il en va de même pour les contraintes induites dans l'amplificateur. De plus, la zone de report de la poutre se situe assez loin du bout du substrat trempé dans le bain.
- Les résistances d'ajustement actif sont aussi placées relativement loin de la zone trempée. De plus, leur grande taille leur confère une moindre sensibilité à l'endommagement causé par l'ajustement laser. Finalement, une évolution de l'ajustement de R16 (la résistance d'ajustement actif du span) augmenterait en principe sa valeur, et diminuerait donc le span. Or, c'est le contraire qui tend plutôt à se produire.
- Inversement, les résistances d'ajustement passif se trouvent près de la zone trempée, sont assez petites, et influencent le span.

Une augmentation des valeurs de R1 et R4, les plus proches de la zone trempée, qui semblent les moins stables (voir chapitre 3) et qui entrent au numérateur du gain<sup>5</sup> est donc l'hypothèse la plus probable. Les mesures à prendre dans le futur pour augmenter la stabilité de l'ajustement sont donc le verriage de l'ajustement passif (si l'imprécision résultante est tolérable), et / ou le déplacement de ces résistances plus loin de la zone trempée.

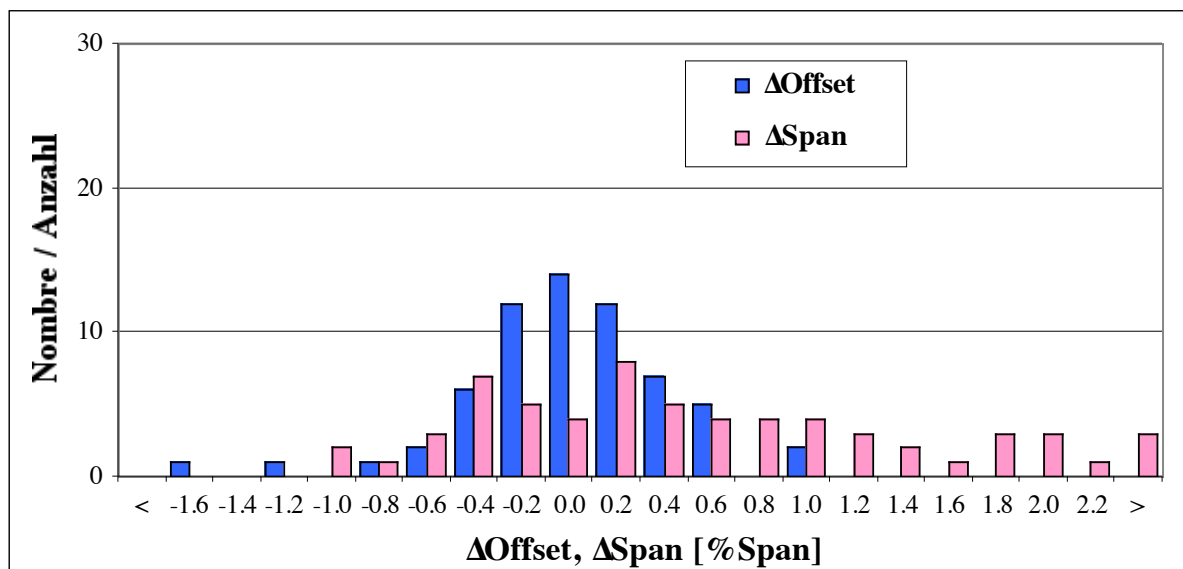


Figure 5–1. Histogramme des erreurs d'ajustement des capteurs, en offset et en span, après montage des pattes de sortie SIL. Capteurs no 6100 à 6164.

<sup>5</sup> Guide "Ajustement de l'électronique de type "Huba DT 400", T. Maeder, 15.5.2000.

## 6. Conclusions

Cette étude portait sur la caractérisation de la 2<sup>e</sup> version du capteur de force MilliNewton, comportant moult améliorations visant à en augmenter la précision et la stabilité d'ajustement.

Ces modifications ont atteint leur but, dans le sens que l'offset et le span – moyennant encore quelques aménagements de la procédure d'ajustement – sont ajustables précisément, et restent stables au stockage. De plus, le *TCO* de la poutre est bon, ce qui ne nécessite qu'un ajustement réduit, voire laisse envisager la commercialisation de versions sans ajustement en température.

En revanche, la stabilité de l'ajustement est encore problématique lors du montage des pattes de sortie SIL par trempage dans un bain de brasure à 240°C. La cause la plus probable de cette instabilité est l'ajustement passif des résistances R1 et R4 (pâte 100kΩ, numérateur du gain), qui sont les plus proches du bout de l'embase trempé dans le bain et semblent aussi être en soi les plus instables.

Plusieurs voies seront donc tentées pour confirmer cette hypothèse et élucider d'autres sources d'instabilité de l'ajustement.

- Des exemplaires utilisant des électroniques alternatives "Kolbasi 1" et "Kolbasi 2", qui ne comportent pas de résistances d'ajustement passif influençant le signal de sortie, seront ajustés et comparés aux "DT400".
- Quelques embases seront verrées ou recuites après ajustement passif, ce qui devrait en améliorer considérablement la stabilité. Cette mesure augmente l'imprécision d'ajustement, mais devrait être tolérable étant donné la procédure d'ajustement actuelle, assez prudente. En plus de la stabilisation de l'endommagement dû à la coupe laser, un scellement par verrage des coupes dans les résistances évite la conduction parasite due à d'éventuelles contaminations et / ou l'humidité, ce qui est particulièrement important pour les résistances à haute valeur R1 et R4.
- Dans le futur, le layout pourra être modifié afin d'éloigner les résistances R1 et R4 des pattes de sortie. De plus, comme elles semblent les plus instables, on pourra aussi en augmenter quelque peu la taille dans la mesure du possible.
- Finalement, des tests seront réalisés avec les embases non amplifiées, ce qui permettra de qualifier la stabilité de la poutre et de son report sur l'embase.