



MilliNewton version D – production en série

Résumé. Ce rapport évalue la production d'environ 700 pièces du capteur de force MilliNewton, version D, en variante 400 mN avec compensation en température de l'offset. Par rapport à la version C¹, beaucoup d'avancées ont été réalisées, mais quelques problèmes subsistent au niveau du layout de l'embase, et la rigidité de la table de sérigraphie est insuffisante.

Thomas Maeder, 17.5.2005

Projet: MilliNewton

Mots-clefs: capteur de force, MilliNewton, production

Table des matières

1. INTRODUCTION	2
2. PRODUCTION DE LA POUTRE	3
3. PRODUCTION DE L'EMBASE	5
4. CALIBRAGE ACTIF DU CAPTEUR	7
5. CONCLUSIONS.....	10

¹ "MilliNewton – production en série (version C)", rapport EPFL-LPM, 2004-06-11.

1. Introduction

1.1. Description

Le capteur de force MilliNewton (Figure 1) à sortie analogique amplifiée est un produit de démonstration des capacités du LPM en développement et production de dispositifs en couches épaisses. Tout en étant bon marché et facile à produire avec un investissement réduit en moyens de production et de calibrage, il permet la mesure de petites forces avec une précision raisonnable, de l'ordre de 2%. En outre, une compensation en température de l'offset est possible moyennant un 2^e passage dans l'installation de calibrage.

En plus de sa fonction de démonstration, ce produit sert de point de base à d'autres réalisations (capteurs de force, de pression et de déplacement) basés sur le même principe.

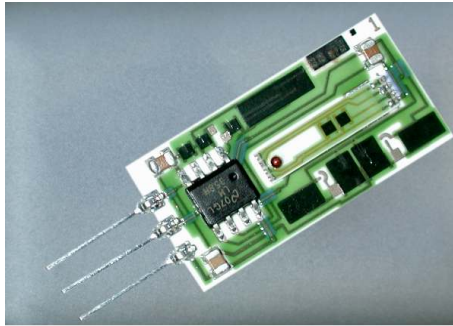


Figure 1. Le capteur de force MilliNewton.

1.2. Nomenclature

La nomenclature des variantes est donnée ci-dessous. Elle est valable pour la variante actuelle "A".

v-ffff-s-c[tt]-a

- v **Variante de base.** Seule la variante de base "A" existe actuellement. Elle est basée sur une embase de 25.4 x 12.7 mm.
- ffff **Force maximale.** Ces 4 chiffres donnent la force à pleine échelle en mN. Actuellement, les variantes existantes sont 400, 1'000 et 2'000 mN (0400, 1000 et 2000).
- s **Sorties.** On peut spécifier comme sortie "P" (*Pad*, plages) ou "S" (avec pattes *SIL Single In-Line*).
- c **Compensation en température.** Les variantes sont "C" (compensé en température) et "U" (non compensé). Dans ce dernier cas, l'ajustement est réalisé à température ambiante par défaut, ou à la température spécifiée en °C par <tt>.
- a **Signal électrique de sortie.** Il n'y a qu'une possibilité, "A". Celle-ci correspond à une tension de sortie ratiométrique nominale allant de 10% (force nulle) à 70% (force à pleine échelle) de la tension d'alimentation. La tension d'alimentation est de 5.00 ± 0.25 V.

Exemples

A-0400-S-C-A	La variante de base, 400 mN avec pattes de sortie et compensation en température de l'offset.
A-1000-P-U-A	Capteur de 1'000 mN, avec plages de sortie et sans compensation en température de l'offset.
A-0400-S-U30-A	Capteur de 400 mN, avec pattes de sortie, sans compensation en température, mais ajusté à 30°C.

1.3. Production

Les étapes principales sont données ci-dessous, et décrites en détail dans les chapitres ultérieurs.

- 1) **Production de la poutre.** Cette partie comprend la déposition des couches épaisses, l'ajustement grossier de l'offset et le recuit de stabilisation, ainsi que le montage de la bille.
- 2) **Production de l'embase.** Cette partie comprend également la déposition des couches épaisses, une étape d'ajustement (ajustement passif de résistances) suivie d'un recuit de stabilisation. Ensuite, les composants (3 condensateurs, l'amplificateur et la poutre) sont montés en batch.
- 3) **Calibrage actif du capteur.** Le calibrage en substrat du capteur a été introduit dans la version précédente (C). Le calibrage peut se dérouler en une passe (sans compensation en température) ou deux passes (phase initiale à haute température suivie d'une phase finale à température ambiante).
- 4) **Opérations finales.** Cette partie comprend le cassage et le montage optionnel des pattes SIL. Après contrôle, il est encore possible de corriger les capteurs qui sont hors spécifications en les montant dans des posages adaptés.

2. Production de la poutre

2.1. Description

La poutre (Figure 2) est une pièce en alumine (standard) de 12.8 x 3.0 mm. Il y a 210 = 7 x 30 pièces par substrat. L'épaisseur de la poutre est 0.25 mm (capteurs 400 mN), 0.40 mm (pour 1'000 mN) et 0.635 mm (pour 2'000 mN).



Figure 2. Poutre du capteur MilliNewton.

2.2. Etapes de production

Les étapes de production sont décrites ci-dessous.

- 1) **Sérigraphie de la poutre.** La poutre est un circuit double face et nécessite une phase de métallisation des trous. Pour chaque face, on a : AgPd ESL 9635B (+ métallisation des trous), or fin ESL 8837, résistances et verrage (mat, 580°C). Il y a deux co-cuissons : les résistances (pont : DP 2041, 10 kOhm, dessus et dessous ; ajustement : DP 2031, 1 kOhm, dessous), et les verrages (ESL G-481 sur les deux faces). Ces co-cuissons sont réalisées sur des supports en acier permettant de maintenir une distance > 10 mm entre la face inférieure et la bande du four, et garantissant donc une bonne évacuation des organiques.
- 2) **Ajustement de l'offset sur la poutre.** Dans cette version, l'offset est grossièrement ajusté en coupant dans des résistances additionnelles, placées sous la poutre.
- 3) **Recuit de stabilisation de l'offset.** Après ajustement, on recuit la poutre à 630°C, afin de stabiliser la coupe dans les résistances d'ajustement et donc l'offset. Ce recuit est réalisé sur les supports utilisés pour la co-cuisson des résistances et des verrages.
- 4) **Sérigraphie de la brasure sur la face supérieure.** Cette brasure a deux rôles : court-circuiter certaines ouvertures dans les liaisons électriques nécessaires à l'ajustement de l'offset, et permettre le montage de la bille.
- 5) **Montage de la bille.** La bille est montée sur la brasure fraîche sérigraphiée.
- 6) **Refusion face supérieure.** La brasure est refondue, ce qui fixe la bille et ferme les courts-circuits.
- 7) **Sérigraphie de la brasure sur la face inférieure, étamage de la poutre.** Cette étape permet de réaliser un étamage de la plage principale de brasure.
- 8) **Refusion face inférieure.**
- 9) **Cassage et stockage.** Le substrat est cassé, et les poutres individuelles sont stockées en carrier en vue du montage sur l'embase.

2.3. Evaluation

- 1) **Sérigraphie - métallisation des trous.** Avec la nouvelle table de sérigraphie, la métallisation des trous est beaucoup plus fiable que lors de la dernière série, en raison de la puissance d'aspiration beaucoup plus élevée de la pompe, et ne constitue donc plus un problème, du moins pour les substrats de 0.25 mm.
- 2) **Sérigraphie – verrage.** Le respect, cette fois-ci, de la procédure de fabrication (co-cuisson des verrages) donne des poutres nettement mieux ajustées en offset et en *TCO*, (voir plus loin). Ce changement et la métallisation des trous sont les deux grosses améliorations réalisées par rapport à la série précédente.
- 3) **Ajustement – résistances.** L'utilisation d'une autre composition (DP 2031 au lieu de DP 2041) pour l'ajustement de l'offset n'est pas une bonne chose, car elle contribue à de grandes valeurs de *TCO* en cas d'ajustement important. Cependant, DP 2041 n'est pas très stable à l'ajustement...
- 4) **Ajustement – plages de sortie.** Actuellement, les trous métallisés sont liés, ce qui crée des interconnexions entre les pièces – le programme d'ajustement ne peut pas bien discriminer entre bonnes et mauvaises poutres. Il serait donc préférable de séparer ces plages.

- 5) **Brasure – étamage.** Il faudra revoir le layout de la poutre afin de créer de vraies plages de contact pour les sorties, en évitant que la brasure aille dans les trous métallisés. Ceci améliorera considérablement la fiabilité de l'assemblage de la poutre. De plus, les plages de sortie sont trop petites.

2.4. Modifications proposées

A court terme

A court terme, on se propose de maintenir la poutre telle quelle, car elle a maintenant atteint un niveau acceptable de qualité et de fiabilité.

A moyen / long terme

- **Taille de la poutre.** On se propose d'augmenter la longueur (afin de pouvoir éviter les trous au bord), et donc l'interférence électrique entre plusieurs poutres.
- **Plages de contact.** On conserve la plage principale, mais on modifie la disposition des contacts électriques à l'arrière, en passant à 2 x 2 au lieu de 4 x 1. Cette configuration permettrait d'augmenter la taille des plages (amélioration de la fiabilité de l'ajustement et du brasage) tout en permettant de rendre la poutre plus étroite, ce qui est avantageux pour les faibles forces et du point de vue des contraintes parasites.
- **Résistances.** Pour l'instant, on s'en tient à la solution actuelle (DP 2031), car la stabilité de DP 2041 en tant que résistance d'ajustement n'est pas démontrée. Cependant, il faudrait qualifier DP 2041 pour ce rôle, afin de n'avoir dans le futur que cette composition sur la poutre.

3. Production de l'embase

3.1. Description

L'embase est une pièce en alumine (standard) de 25.4 x 12.7 mm et de 1 mm d'épaisseur. Il y a 28 = 4 x 7 pièces par substrat. Le circuit électronique utilisé est celui du DT400 de Huba Control, qui utilise les deux moitiés d'un double amplificateur opérationnel (LM 358) comme amplificateur d'instrumentation. Les numéros de substrat des embases utilisées sont 05–200 à 05–236. Noter qu'il en reste encore quelques-unes, pour les autres variantes (1 et 2 N).

3.2. Etapes de production

Les étapes de production sont décrites ci-dessous.

- 1) **Sérigraphie de l'embase.** L'embase est essentiellement un circuit simple face (avec un simple renfort sur l'autre face pour améliorer la fixation des contacts SIL). La séquence est : conducteur arrière, conducteur avant, diélectrique (2x ESL 4913, cuisson séparée), 2^e conducteur avant (tous conducteurs : AgPd ESL 9635B), résistances (DP 2021 – 100 Ohm, DP 2041 – 10 kOhm, ESL 3915 – 100 kOhm et ESL 2612I – 100 Ohm PTC), cocuites. Dans la version C précédente, on a remplacé DP 2051, notoirement difficile à ajuster, par ESL 3915.

- 2) **Ajustement passif.** On ajuste 7 résistances : R1 et R4 (100 kOhm \pm 1.5%), R2 et R3 (10 kOhm \pm 2%), R5 (200 Ohm \pm 15%), R16 (300 Ohm \pm 10%) et R17 (200 kOhm \pm 10%).
- 3) **Recuit de stabilisation de l'ajustement passif.** Après ajustement, on recuit l'embase à 580°C, afin de stabiliser les résistances d'ajustement passif.
- 4) **Sérigraphie et séchage du diélectrique d'espacement.** Ce diélectrique (ESL 4916) n'est que séché, et sert à fixer l'espace entre la poutre et l'embase lors du montage. Pour que la poutre colle un peu, on y ajoute un peu de décapant (flux) de brasure. On a modifié le layout de sérigraphie (bande), afin d'obtenir une épaisseur plus reproductible.
- 5) **Sérigraphie de la brasure.** Cette brasure a deux rôles : court-circuiter une ouverture dans les liaisons électriques, nécessaire à l'ajustement passif, et permettre le montage de la poutre et des composants. Dans la version D, les courts-circuits sont indépendants, et non plus combinés avec une plage de brasure de l'amplificateur, solution peu fiable.
- 6) **Montage de la poutre et des composants.** Le montage est réalisé par la placeuse SMD ; la poutre est posée dans des carriers, et les composants (3 condensateurs + un amplificateur opérationnel double) sont en rouleaux.
- 7) **Refusion.** La brasure est refondue, ce qui fixe la poutre, les composants, et ferme le court-circuit.
- 8) **Nettoyage.** Le décapant est nettoyé aux solvants. En même temps, les solvants dissolvent le diélectrique d'espacement séché.

3.3. Evaluation

- 1) **Sérigraphie – conducteur.** La liaison vers la plage centrale de contact (sortie du capteur) est trop courte, et le contact n'est pas assuré de manière fiable.
- 2) **Sérigraphie – conducteur (bis).** Une des plages de contact manque – on ne peut pas ajuster R3 et R16 en passif, et l'on a dû se rabattre sur un ajustement de R3 en assumant une valeur pour R16...
- 3) **Sérigraphie - résistances.** Il y a globalement un problème de flexion du porte-cale lors de la sérigraphie, ce qui donne des résistances plus épaisses (de valeur plus basse) au centre, et plus minces à la périphérie, ce qui pose surtout un problème pour ESL 3915, plus fluide. On a donc gardé la tolérance de +20% (paire R1+R4) et de +6% (paire R2+R3), dans laquelle on ajuste la résistance la plus faible de la paire à la même valeur que l'autre.
- 4) **Ajustement passif – compositions.** Globalement, le comportement à l'ajustement est bon ou acceptable (DP 2041), abstraction faite des problèmes d'épaisseur excessive au centre. Il faudra penser à remplacer ESL 3915, qui contient du Cd.
- 5) **Diélectrique d'espacement.** Avec le nouveau layout, l'épaisseur est plus reproductible.
- 6) **Brasure – court-circuit.** Les courts-circuits indépendants se sont révélés très fiables, et ne constituent donc plus un problème.

3.4. Modifications proposées

A court terme

- **Résistances - sérigraphie.** On doit rigidifier le porte-cale de la table de sérigraphie avant toute évaluation précise des valeurs.
- **Résistances – ajustement de l'offset.** On doit raccourcir les résistances d'ajustement de l'offset de 0.4 mm environ, en raison de la nouvelle tête du dispositif de mise en charge, quelque peu plus large que l'ancienne.
- **Zone de marquage de l'embase.** Dans le layout du diélectrique ou d'une des compositions résistives, il faut introduire une zone de marquage, qui permet au programme d'ajustement de marquer la progression des ajustements, et donc l'état des substrats.
- **Suivi automatique des étapes.** On peut étendre le concept ci-dessus afin de rendre les étapes d'ajustement reconnaissables par la machine. On pourrait par exemple déposer deux plages reliées par une résistance (chapeau très allongé), dont on incrémente progressivement la valeur au fil des étapes d'ajustement.
- **Montage de la poutre.** Il faudrait pouvoir effectuer une reconnaissance optique sur la poutre.

A moyen / long terme

- **Ajustement - compositions résistives.** On envisage le remplacement de DP 2041 par ESL 3914 à court terme, puis de ESL 3914 et 3915 par une autre famille (Cd!). On évaluera donc ESL 3914, ESL R312, R314 et R315. On testera notamment le comportement à l'ajustement (test de coupe longitudinale), et le facteur de jauge (idéalement petit).
- **Brasure utilisée.** On doit passer aux brasures sans plomb – Sn–Ag et Sn–Ag–Cu sont les candidats les plus probables.
- **Brasure de la poutre.** On envisage de braser en atmosphère contrôlée, mesure recommandée aussi lors de l'abandon des brasures au plomb.
- **Circuit d'amplification.** A long terme, on passera à un schéma à amplificateur unique, ne nécessitant pas de courts-circuits et dont le gain est initialement faible : SH200.

4. Calibrage actif du capteur

4.1. Description

La présente version D est la 2^e où les capteurs ont été ajustés en substrat, sans cassage préalable. Dans cette version, la tête du dispositif de mise en charge a été remplacée par une version plus "propre" mécaniquement.

L'ajustement du capteur de force MilliNewton se déroule en un (sans compensation en température) ou deux (avec compensation en température) passages dans le laser. Il y a quatre options de passage.

- a) **Compensé – 1^{er} passage.** Les étapes 1–6 sont réalisées à 70°C, de sorte à donner un capteur avec un span légèrement trop élevé, et un offset de référence précis qui permettra le calcul au 2^e passage de la compensation en température nécessaire.
- b) **Compensé – 2^e passage.** Les étapes 7–11 sont réalisées à température ambiante (<30°C).
- c) **Compensé – reprise haute température.** Au cas où le substrat aurait été recalé lors de la phase de compensation en température (en raison d'un *TCO* excessif), seule l'étape 6 doit être répétée à 70°C.
- d) **Non compensé – ajustement complet.** Toutes les étapes sont réalisées, à l'exception des étapes 6 à 8, spécifiques à la compensation en température.

4.2. Etapes de calibrage

Les 11 étapes de la procédure d'ajustement sont décrites ci-dessous.

Etapes initiales communes

- 1) **Marquage des capteurs.** On marque la gamme avec le multiplicateur (μ , m ou c), ainsi que le no du substrat (xx-yyy), où xx sont les deux derniers chiffres de l'année, et yyy le no du substrat dans l'année.
- 2) **Ajustement de l'offset.** Sans charge, l'offset est désaturé en agissant sur les résistances de réglage d'offset, puis amené dans un domaine situé vers le bas de l'échelle, compatible avec l'ajustement du span.
- 3) **Désaturation sous charge.** La charge de calibrage est appliquée, puis la sortie est désaturée en coupant dans R16.
- 4) **Ajustement de l'offset.** La charge est enlevée, et l'offset est réajusté un peu ici s'il a trop diminué.
- 5) **Pré-ajustement du span.** L'offset est mesuré, puis la charge de calibrage est appliquée à nouveau. R16 est coupé une 2^e fois afin d'obtenir un span environ 10% trop élevé.

Si compensé en température, 1^{er} passage

- 6) **Ajustement fin de l'offset pour compensation *TCO*.** L'offset est ajusté précisément à haute température (70°C), à 15% de l'alimentation U_s ($U_s = 5.00$ V).

Si compensé en température, 2^e passage – compensation *TCO*

Au début, on mesure l'offset. La variation après refroidissement à température ambiante par rapport à la valeur ajustée à l'étape 5 permet de calculer la compensation nécessaire. A cette fin, il faut aussi entrer la température du porte-substrat lors de ce 2^e passage. Le décalage d'offset nécessaire à réaliser avec les résistances PTC est :

$$\Delta_{\text{offset(PTC)}} = - \frac{(\text{offset à haute température} - \text{offset à basse température})}{(\text{haute température} - \text{basse température}) \cdot (\text{TCR des PTC})}$$

Les deux étapes suivantes sont réalisées au 2^e passage, mais sur tout le substrat (tous les capteurs) avant de passer à l'ajustement final. Ceci permet d'interrompre l'ajustement à ce stade en cas de *TCO* excessif (voir ci-dessous).

- 7) **Ajustement de l'offset.** L'offset est ajusté (résistances d'offset) si nécessaire pour permettre ensuite l'ajustement des résistances PTC sans saturer la sortie.
- 8) **Compensation de TCO.** On ajuste ensuite l'offset via les résistances PTC cette fois, de sorte à réaliser le décalage donné par la formule ci-dessus.

Contrôles

- Si au moins un *TCO* trop grand pour permettre une compensation précise est détecté sur un des capteurs ($\pm 1'080$ ppm/K = ± 0.18 %/K, environ ± 4 ppm/K sur le pont), le programme réalise la compensation dans la mesure du possible, puis, au lieu de continuer avec l'ajustement final, éjecte le substrat en signalant qu'il faut le reprendre à haute température.
- Si, au contraire, *TCO* est petit (± 70 ppm/K = ± 0.012 %/K), aucun ajustement n'est réalisé.
- Noter que ces seuils ont été un peu diminués par rapport à la version C, afin d'améliorer la qualité de l'ajustement.

Etapes finales communes

- 9) **Ajustement de l'offset.** Sans charge, l'offset est ramené vers le bas de l'échelle afin de pouvoir ajuster le span final.
- 10) **Ajustement final du span.** Après mesure de l'offset, la charge de calibrage est appliquée et le span ajusté à sa valeur nominale : 60% de U_s .
- 11) **Ajustement final de l'offset.** La charge de calibrage est enlevée, et l'offset ajusté à sa valeur nominale : 10% de U_s .

Marquage du substrat

Dans cette version D, un marquage du substrat a été introduit afin de pouvoir suivre chaque étape de l'ajustement et donc minimiser les risques d'erreur. Celui-ci est encore peu visible, car il se fait directement sur l'alumine (il faudra sérigraphier une zone de marquage dans la version future). Les symboles correspondants sont donnés ci-dessous.

Symbole	Description
M	Marquage (étape 1) effectué
T1 ou T1-H	Ajustement, 1 ^{ère} phase (T1: <i>TCO</i> non compensé ; T1-H: compensé, 70°C)
TCO-R	Compensation <i>TCO</i> effectuée, mais insuffisante : substrat à repasser
T1-HR	→ reprise à 70°C de l'offset effectuée, pour reprise <i>TCO</i>
TCO-OK	Compensation <i>TCO</i> effectuée avec succès : passe à l'ajustement final
T2	Ajustement final du capteur effectué

4.3. Evaluation

- **Rendement de fabrication.** Le rendement est nettement meilleur que celui de la série précédente (C), en raison de la meilleure qualité des poutres et d'améliorations de leur procédure de montage sur l'embase.
- **Span.** Le span étant initialement beaucoup trop élevé (saturé), son ajustement est un peu laborieux – une étape supplémentaire de charge / décharge est nécessaire. Ce problème a été aggravé dans la version D en raison de la plage manquante d'ajustement de R16. Idéalement, on veut un circuit où le span initial est faible (SH200).
- **Compensation de TCO.** Les valeurs de *TCO* sont nettement meilleures que celles de la version C, en raison de la meilleure qualité des poutres. Environ la moitié des substrats passent en une fois, et le *TCO* résiduel des autres après un passage est très faible. Cette étape est donc nettement moins laborieuse. En revanche, ici aussi, un circuit à span initial faible permettrait d'améliorer encore cette étape.
- **Ajustement du span.** La nouvelle tête du système de mise en charge donne entièrement satisfaction. Le circuit a cependant un défaut : on ne peut théoriquement pas rattraper un span trop petit (sauf en "trichant" en coupant dans R2 – voir document séparé).

4.4. Modifications proposées

Globalement, le circuit est satisfaisant, hormis les problèmes de l'ajustement.

- **Marquage de l'ajustement.** On étendra le marquage de l'ajustement (voir "embase") en y ajoutant une résistance et des contacts, afin de rendre les phases d'ajustement reconnaissables par la machine. On devrait ainsi exclure tout risque d'erreur de manipulation des substrats.
- **Circuit d'amplification.** On passera à long terme au nouveau circuit à amplificateur unique, dont le gain est initialement petit. Ce circuit devrait faciliter considérablement l'ajustement du span et de *TCO*. De plus, on peut légèrement revenir en arrière avec l'ajustement du span.

5. Conclusions

Cette version D de MilliNewton est de loin la plus aboutie, et peut être produite telle quelle moyennant la correction de quelques petites erreurs ainsi quelques ajustements.

- Correction des petites erreurs du layout de l'embase.
- Introduction d'une zone de marquage et d'une résistance associée pour un meilleur suivi des étapes d'ajustement.

Quelques études complémentaires doivent encore être réalisées.

- **Dérive ultérieure de l'offset.** L'offset est initialement très précis, mais dérive quand on casse les substrats, nécessitant un contrôle et une reprise de certaines pièces. La raison est peut-être à chercher dans des contraintes internes dans le substrat de l'embase, et la situation peut donc être améliorée par l'utilisation de résistances avec un effet de jauge plus faible sur l'embase.
- **Résistances.** On fera les premières études (quelques embases et test patterns) pour les séries ESL 391x et R300.