



MilliNewton – production en série (version C)

Résumé. Ce rapport évalue la production des deux premières séries du capteur de force MilliNewton au LPM (1'500 pièces avec compensation en température), les problèmes rencontrés et les solutions potentielles. Hormis quelques erreurs de jeunesse, MilliNewton est un produit relativement mûr. Les principales difficultés restantes portent sur la fabrication de la poutre (trous métallisés, coefficient en température), son placement sur l'embase et son brasage.

Thomas Maeder, 11.6.2004

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	9
5. CONCLUSIONS.....	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.

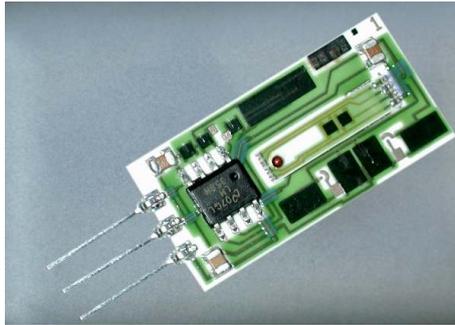


Figure 1. Le capteur de force MilliNewton.

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.** Par rapport aux séries précédentes, la grande innovation est le calibrage en substrat du capteur, beaucoup plus rationnel. 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.

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).

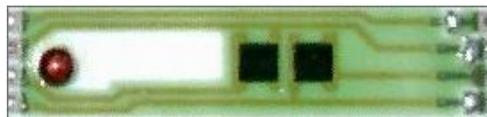


Figure 2. Poutre du capteur MilliNewton.

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 : Ag:Pd (+ métallisation des trous), Au fin, résistances et verrage (mat, 580°C).
- 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.
- 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 carier en vue du montage sur l'embase.

2.3. Aspects critiques rencontrés

- 1) **Sérigraphie - métallisation des trous.** Les trous ont été en général mal métallisés (trous bouchés, mauvais accrochage de la pâte sur les flancs), vraisemblablement en raison d'une aspiration insuffisante. Le nouveau posage de sérigraphie devrait permettre de lever ce problème.
- 1) **Sérigraphie – verrage.** Par erreur, certains substrats ont été passés au verrage à 630°C sur une face seulement. Il va sans dire qu'un tel traitement très asymétrique génère des valeurs d'offset et de *TCO* très mauvaises...
- 2) **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...
- 2) **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.
- 7) **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. Corrections proposées

A court terme

- **Verrage.** Idéalement, avant ajustement de l'offset, co-cuire le verrage à 580°C sur les deux faces, ou à la rigueur cuire une face après l'autre, mais sans dépasser 580°C. Le traitement à 630°C ne sera fait qu'après ajustement de l'offset.
- **Etamage.** Etamer tous les 5 contacts de la poutre (le grand plus les 4 petits). Cette procédure devrait être facile et fiable si on change les plages de contact (voir ci-dessus).

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. Les problèmes de *TCO* devraient diminuer si on évite les erreurs commises avec le verrage (voir ci-dessous).

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 le type "DT400", qui utilise les deux moitiés d'un double amplificateur opérationnel (LM 358) comme amplificateur d'instrumentation. Les deux séries d'embases produites sont données ci-dessous.

- 04-100...04-122 : 400 mN compensé en température pour distribution en Europe
- 04-130...04-170 : 400 mN compensé en température pour instruments médicaux
- 04-180 : 1'000 mN : un substrat pour réserve
- 04-181 : 2'000 mN : un substrat pour réserve & commande EICN.

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). En revanche, la sérigraphie comporte moult étapes, car elle requiert 4 compositions résistives (DP 2021 – 100 Ohm, DP 2041 – 10 kOhm, ESL 3915 – 100 kOhm et ESL 2612I – 100 Ohm PTC) et un niveau de croisement. Dans cette série, 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.
- 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.
- 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. Aspects critiques rencontrés

- 1) **Sérigraphie - résistances.** Du tableau ci-dessous, on constate que les valeurs moyennes et écarts-types des résistances sont assez bons, mais qu'on rencontre des extrêmes assez anarchiques, notamment supérieures à la valeur nominale, pour R1, R4, R3 et R5. De plus, on observe une nette différence entre les valeurs moyennes de R1 et R4 (env. 10% en moyenne), et entre celles de R2 et R8 (6%). Afin de pallier à un trop grand nombre de résistances plus grandes que leur valeur nominale, il a fallu introduire une 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.

Rés.	Nominal [kOhm]	Tolérance [±%]	Moyenne [%]	Ecart -type [%]	Min [%]	Max [%]
R1	100	1.5 (20*)	-33	6	-50	+5
R4	100	1.5 (20*)	-23	9	-42	+15
R17	200	10	-40	6	-55	-10
R2	10	2 (6*)	-32	3	-39	-2
R3	10	2 (6*)	-26	4	-34	+4
R5	0.2	15	-21	6	-35	+6
R16	0.3	10	-69	6	-76	-50

* Tolérance d'adaptation de la valeur nominale pour les paires R1-R4 et R2-R3.

- 1) **Sérigraphie – court-circuit.** Le court-circuit, réalisé à la place d'une des pattes du circuit intégré, ne fonctionne pas de manière fiable. Actuellement, on doit donc sérigraphier, après l'ajustement passif, une bande d'argent basse température ESL 590G, qui cuit lors du recuit de stabilisation de l'ajustement passif.
- 2) **Ajustement passif – compositions.** La composition DP 2021 s'ajuste très bien, et présente une excellente stabilité. Pour les 100 kOhm, le remplacement de DP 2051 par ESL 3915 a considérablement amélioré la situation. En revanche, DP 2041, bien que moins mauvais que DP 2051, n'est pas très stable à l'ajustement. D'autre part, la série ESL 391x contient du Cd, et n'est donc pas une solution à long terme.
- 4) **Diélectrique d'espacement.** L'épaisseur est difficile à contrôler. De plus, le système consistant à enduire la surface de décapant de brasure pour la rendre collante pourrait être amélioré.
- 5) **Brasure – court-circuit.** Le court-circuit sous une des pattes de l'amplificateur ne fonctionne pas. De plus, on manque un peu de brasure sur les 4 petites plages de contact de la poutre, qu'il est difficile de compenser en raison de la petite taille de celles-ci.
- 5) **Brasure - poutre.** Il y a souvent une grosse bulle dans la plage principale de brasage, si on n'appuie pas sur la poutre lors de la refusion. Si on ne sérigraphie qu'une petite plage de brasure fraîche, on observe alors un mouillage imparfait.
- 6) **Montage de la poutre.** On observe encore quelques difficultés lors du montage de la poutre, ou celle-ci est, dans certains cas, mal positionnée.

3.4. Corrections proposées

A court terme

- **Résistances - sérigraphie.** On doit impérativement améliorer la sérigraphie! Des résultats, on constate que le problème n'est pas dû à une dispersion générale, mais à une minorité de cas problématiques. Les dernières modifications de la table de sérigraphie (cales plus plates, 3 mm d'épaisseur) devraient améliorer la situation.
- **Résistances - géométrie.** Il faudrait réajuster la géométrie de R3 et R4, afin qu'elles donnent environ la même valeur que R2 et R1 respectivement. De plus, R5 doit être légèrement diminué, d'environ 10%.
- **Sérigraphie de la brasure.** A court terme (sans changement de layout), on se propose d'utiliser un masque en tôle gravée au lieu d'une trame, afin de mettre plus de brasure sur les contacts.
- **Court-circuit.** Il faut réaliser le court-circuit avec de la brasure, mais indépendamment des pattes de l'amplificateur – à la manière des courts-circuits actuels sur la poutre, qui ont montré leur fiabilité.
- **Montage de la poutre.** Il faudrait pouvoir effectuer une reconnaissance optique sur la poutre.
- **Brasure de la poutre.** Pour diminuer la porosité du joint de brasure principal, on envisage de refondre la brasure rapidement en pressant légèrement sur la poutre au moyen du montage développé à cette fin.
- **Diélectrique d'espacement.** Il serait intéressant de formuler notre propre diélectrique temporaire d'espacement, afin d'optimiser sa tenue mécanique et son nettoyage.

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.

4. Calibrage actif du capteur

4.1. Description

La présente série est la première où les capteurs ont été ajustés en substrat, sans cassage préalable. 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 1–5 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 6–10 sont réalisées à température ambiante (<30°C).
- c) **Compensé – reprise haute température.** Au cas où le substrat a été recalé lors de la phase de compensation en température (en raison d'un *TCO* excessif), seule l'étape 5 doit être répétée à 70°C.
- d) **Non compensé – ajustement complet.** Toutes les étapes sont réalisées, à l'exception des étapes 5–7, spécifiques à la compensation en température.

4.2. Etapes de calibrage

Les 10 étapes d'ajustement sont décrites ci-dessous.

Etapes initiales communes

- 1) **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.
- 2) **Désaturation sous charge.** La charge de calibrage est appliquée, puis la sortie est désaturée en coupant dans R16.
- 3) **Ajustement de l'offset.** La charge est enlevée, et l'offset est réajusté un peu ici s'il a trop diminué.
- 4) **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

- 5) **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).

- 6) **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.
- 7) **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 ($\pm 1'200 \text{ ppm/K} = \pm 0.2 \text{ \%/K}$, env. $\pm 4 \text{ ppm/K}$ 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 ($\pm 100 \text{ ppm/K} = \pm 0.017\%/K$), aucun ajustement n'est réalisé.

Etapes finales communes

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

4.3. Aspects critiques rencontrés

- **Capteurs saturés.** Il y a encore un nombre relativement important de capteurs saturés. Ce problème est dû au montage, et sera amélioré en optimisant le brasage (voir chapitre 3).
- **Ajustement initial du span.** Le span étant saturé, son ajustement est un peu laborieux – une étape supplémentaire de charge / décharge est nécessaire.

- **Compensation de TCO.** Les valeurs de *TCO* étaient très mauvaises. En moyenne, il y a environ 20...30% des capteurs qui ne pouvaient être compensés en une fois. En pratique, cela veut dire qu'il a fallu reprendre une, voire deux fois tous les substrats, vu que la probabilité d'en trouver un où tous les *TCO* compensables en une fois est très faible. L'ajustement de *TCO* est aussi compliqué par le span initial élevé – un span initial plus faible augmenterait le domaine ajustable de *TCO*.
- **Ajustement du span.** Le système de mise en charge gagnerait à être un peu plus précis. De plus, on ne peut théoriquement pas rattraper un span trop petit (sauf en "trichant" en coupant dans R2 – voir document séparé).

4.4. Corrections proposées

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

- **Capteurs saturés.** Il y a encore un nombre relativement important de capteurs saturés. Ce problème est dû au montage, et sera amélioré en optimisant le brasage (voir chapitre 3).
- **Ajustement.** 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.
- **Ajustement du span – mise en charge.** On corrigera le bras de levier et son "doigt" de calibration des capteurs, afin d'améliorer la reproductibilité de mise en charge.

5. Conclusions

Après plus de 1'500 pièces produites, MilliNewton est plus ou moins au point, mais nécessite encore quelques ajustements dans sa conception et ses méthodes de production.

Dans un premier temps, une série améliorée de 500 pièces sera produite, en intégrant les modifications jugées les plus urgentes.

- **Métallisation des trous des poutres.** Les substrats restants seront sérigraphiés avec la nouvelle table, qui permettra en principe d'obtenir une meilleure fiabilité de métallisation.
- **Mise en charge.** On utilisera et évaluera "doigt" de mise en charge amélioré fabriqué par Igor Saglini.
- **Court-circuit sur l'embase.** La couche supplémentaire de ESL 590G sera remplacée par un court-circuit réalisé par la brasure, mais séparé de la patte de l'amplificateur, cette dernière ne permettant pas de combiner court-circuit et brasage de la patte de façon fiable.
- **Quantité de brasure.** On essaiera d'augmenter la quantité de poutre sur les contacts en utilisant un masque métallique au lieu d'une trame.
- **Procédure de brasure.** On essaiera d'appuyer la poutre sur l'embase afin de limiter la formation de bulles.
- **Résistances.** On fera les premières études (quelques embases et test patterns) pour les séries ESL 391x et R300.