

Ajustement et verrage de poutres monofaces

Etude de l'ajustement de poutres monofaces, et de sa stabilisation par verrage et recuit.

Studie des Abgleichs einseitiger Biegebalken, und derer Stabilisierung durch Schutzglas und Wärmebehandlung.

Thomas Maeder, 3.4.2001

Projets : TEPLAZID / ajustement.

Mots-Clefs: ajustement, stabilité, capteurs de force, monoface, verrage, recuit.

Table des matières

1. Introduction	2
2. Expériences	2
3. Résultats	6
4. Conclusions	11

Résumé

L'ajustement en offset des ponts de mesure entraîne une dégradation de son coefficient en température TCO et de sa stabilité. L'encapsulation et la stabilisation de la zone ajustée par le verrage de protection ESL G-481 permet de considérablement améliorer la stabilité de l'ajustement. Cependant, la température de cuisson habituelle de ce verrage n'est pas suffisante ; la poussière de résistance qui se redépose près de la zone coupée gêne l'adhérence du verrage, malgré un nettoyage aux ultrasons. Pour obtenir néanmoins une bonne adhérence, une cuisson du verrage à une température augmentée d'env. 30–50 K est nécessaire: 630–650°C.

Kurzfassung

Der Grobabweich des Messbrückenoffsets bewirkt eine Verschlechterung dessen Temperaturkoeffizient TKO und deren Stabilität. Die Stabilität des Offsets kann jedoch durch Verglasung des Trimmschnitts mit ESL G-481 Schutzglas erheblich verbessert werden.

Für diese Anwendung reicht aber die normale Einbrenntemperatur dieses Glases nicht aus ; Staub aus dem geschnittenen Widerstand setzt sich in der Nähe des Trimmschnitts herab und beeinträchtigt dort die Haftung des Glases, trotz Reinigung nach dem Abgleich im Ultraschallbad. Gute Haftung in dieser Zone erfordert eine um 30–50 K erhöhte Einbrenntemperatur des Glases : 630–650°C.

1. Introduction

L'expérience accumulée tend à montrer que les capteurs où l'ajustement grossier de l'offset est protégé par un verrage ou un verre de scellement (famille des capteurs de pression de type "Glaslot") sont plus stables que ceux où cet ajustement est laissé brut (capteurs à poutre de type "DT400"). En effet, la coupe laser dans une résistance constitue un point faible ; l'altération thermique, la microfissuration, et l'absence de protection sont autant de facteurs d'instabilité. La couverture par un verrage et le recuit associé peuvent y remédier dans une large mesure.

- L'altération thermique au voisinage de la coupe est stabilisée par le recuit.
- La microfissuration est dans une large mesure stabilisée, le cycle thermique stabilisant et / ou guérissant les fissures. La présence de verrage peut aussi contribuer à cette stabilisation.
- Le verrage, déposé après la coupe, la recouvre et la protège des influences extérieures. Un effet similaire peut aussi être obtenu si le verrage, déposé avant la coupe, est recuit après à une température suffisante pour couler un peu.

En revanche, l'influence du verrage et du recuit associé sur des résistances ajustées dépend de la composition résistive, de l'épaisseur et des conditions de coupe, et peut donc être assez difficile à contrôler¹².

- Si on utilise une puissance de coupe insuffisante, la coupe tend à se "refermer" électriquement au verrage : la valeur de la résistance ajustée tend à revenir à l'état initial.
- Inversement, l'utilisation d'une puissance de coupe excessive entraîne une augmentation supplémentaire de la valeur de la résistance lors du verrage.

Dans la série de résistances Du Pont (DP) 20x1, les hautes valeurs (DP 2041 – 10 k Ω et DP 2051 – 100 k Ω), sont assez critiques. En revanche, pour les valeurs inférieures (DP 2021 – 100 Ω et DP 2031 – 1 k Ω), ainsi que la composition PTC ESL 2612, il suffit d'utiliser une puissance de coupe suffisante.

Le capteur de force à poutre monoface, qui est envisagé pour la production à grande échelle et à très bas coût de capteurs de force³, constitue aussi un excellent moyen d'étude des ponts de mesure. De plus, la sérigraphie faite sur une seule face permet un bon appariement de l'offset et de faibles coefficients en température TCO ^{4,5}. Le présent travail continue les études précédentes ; il vise à déterminer s'il est possible de réaliser un ajustement grossier stable de l'offset en le recouvrant d'un verrage protecteur (ici ESL G-481). La résistance utilisée (DP 2041) est exigeante vis-à-vis des conditions de coupe, et constitue donc un critère sévère de validation de cette méthode.

2. Expériences

Echantillons

6 substrats de 0.8 mm d'épaisseur, en Al₂O₃ 96%, ont été sérigraphiés avec le pont monoface. Un plan du substrat, ainsi qu'une photo correspondante, sont donnés aux figures 2-1 et 2-2. Les conditions de sérigraphie et de cuisson (850°C, profil "30MN_PR") sont standard (voir référence [5], procédure 1), sauf pour le verrage. La liste des pâtes de sérigraphie utilisées est donnée au tableau 2-I, et les réglages du four pour les différents profils de cuisson sont reportés au tableau 2-II.

¹ Rapport "Stabilité au verrage de résistances ajustées - résultats préliminaires", T. Maeder, 9.1.2001.

² Rapport "Stabilité au verrage de résistances ajustées - résultats préliminaires (2)", T. Maeder, 15.1.2001.

³ Rapport de diplôme, "Capteur de force pour souris", O. Mathis, 23.2.2001.

⁴ Rapport "Offset et coefficient en température des prototypes de poutres monofaces, non ajustées", T. Maeder, 16.1.2001.

⁵ Rapport "Offset et coefficient en température de poutres monofaces en fonction de la procédure de sérigraphie et des terminaisons", T. Maeder, 2.3.2001.

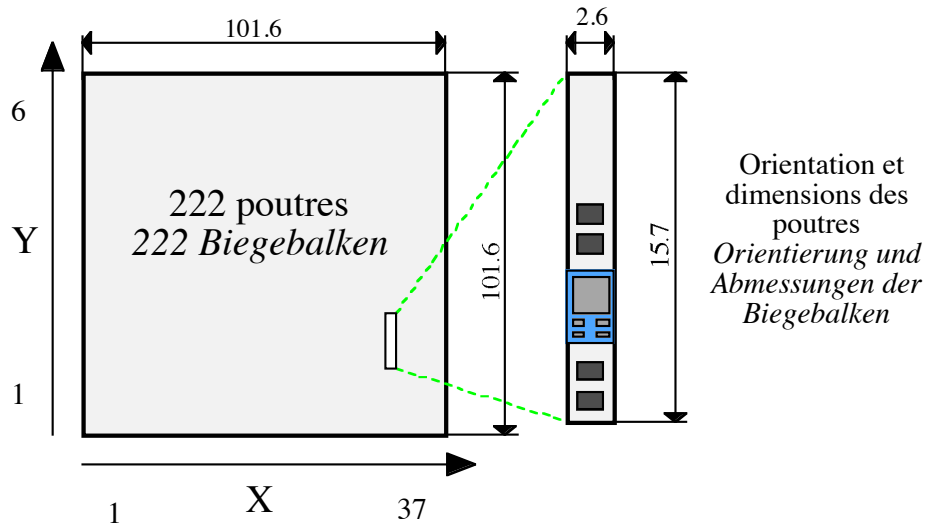
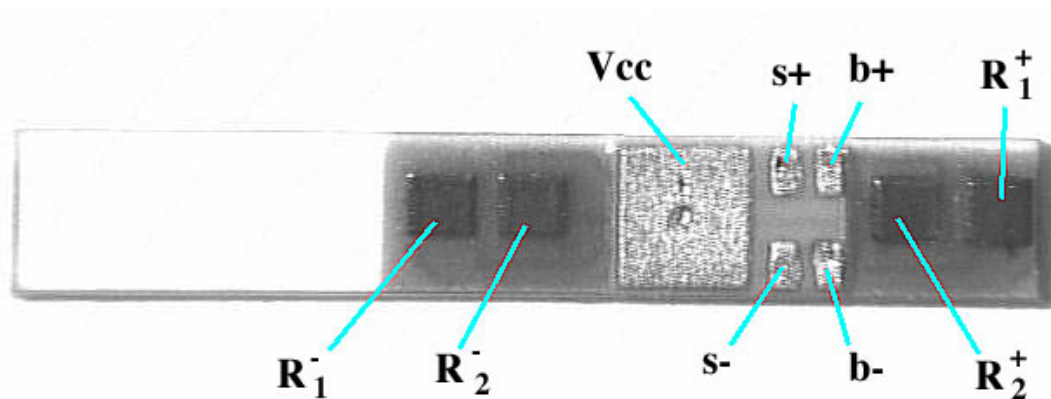


Figure 2-1. Définition des coordonnées des poutres sur le substrat, orientation et dimensions.

Figure 2-2. Photo d'une poutre monoface sérigraphiée. V_{cc} : alimentation positive. R_1^+, R_2^+ : résistances inactives. R_1^-, R_2^- : résistances en compression.

Nos substrats	01-720 à 01-725
Terminaisons	01-720 à 01-722 : ESL 9635B (Ag:Pd 3:1) 01-723 à 01-725 : ESL 8837 (Au fin)
Résistances	DP 2041 (10 k Ω)
Diélectrique	ESL 4913, 2 couches
Plages de brasage / de collage	ESL 9635B (Ag:Pd 3:1)
Verrage (plus tard)	ESL G-481 (profil de cuisson "ESL_600")

Tableau 2-I. Pâtes de sérigraphie utilisées pour les poutres monofaces.

Profil	Température nominale [°C]	Vitesse de bande [cm/min]	Zone 1 [°C]	Zone 2 [°C]	Zone 3 [°C]	Zone 4 [°C]	Zone 5 [°C]	Zone 6 [°C]
30MN_PR	850	8.67	540	765	866	867	876	890
ESL_600	600	8.67	320	500	595	603	610	625
ESL_600 +30°C	630	8.67	320	530	625	633	640	655
ESL_600 +50°C	650	8.67	320	550	645	653	660	675

Tableau 2-II. Réglage du four Sierratherm de l'IPM pour les différents profils.

30MN_PR: cuisson conducteurs, résistances et diélectriques.

ESL_600: cuisson du verrage ESL G-481.

ESL_600 + 30°C, +50°C: recuits ultérieurs.

Traitements après sérigraphie et mesures

Après la sérigraphie du pont monoface, les substrats ont été soumis aux traitements décrits ci-après. Tout de suite après la sérigraphie, et après chaque traitement, on a mesuré l'offset et son coefficient en température TCO entre env. 25°C et 80°C.

- 1) Ajustement laser de l'offset des poutres à 0.
- 2) Passage au bain à ultrasons, 10 min à pleine puissance.
- 3) Verrage (ESL G-481), et cuisson selon le profil "ESL_600" (voir tableau 2-II).
- 4) 2^e passage au bain à ultrasons, dans des conditions identiques au 1^{er}.
- 5) Recuit selon le profil "ESL_600" augmenté de 30°C (voir tableau 2-II).
- 6) Recuit selon le profil "ESL_600" augmenté de 50°C (voir tableau 2-II).

Ajustement laser

L'ajustement a été réalisé avec le laser de l'IPM, sur la résistance inactive située en bas de la poutre (fig. 2-3). Les paramètres correspondants sont donnés au tableau 2-III. On rappelle que, l'ajustement est unidirectionnel sur ce circuit : l'offset, qui doit être initialement négatif, est ramené à 0 en coupant dans la résistance.

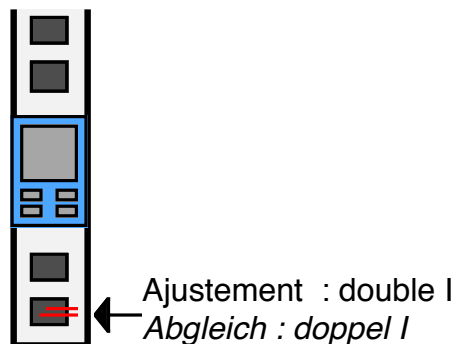


Figure 2-3. Ajustement de la poutre monoface.

Type de coupe	double I, avec 0.2 mm de distance entre les 2 coupes
Puissance	01-720 (Ag:Pd) et 01-723 (Au) : 40% 01-721 (Ag:Pd) et 01-724 (Au) : 45% 01-722 (Ag:Pd) et 01-725 (Au) : 50%
Fréquence	3 kHz, avec réduction de fréquence en mode lent
Vitesse	1 mm/s (rapide) et 0.3 mm/s (lent)
Pilotage	passage à la 2 ^e coupe : -8.0 mV/V ralentissement : -5.0 mV/V fin de l'ajustement : -0.5 mV/V
Acquisition	HP 3458A; temps d'échantillonnage: 1 ms

Tableau 2-III. Paramètres d'ajustement laser.

Mesures

Le signal de sortie s (ratiométrique) est calculé en général comme suit.

$$s = \frac{U^+ - U^-}{V_{cc}}$$

s	signal de sortie (ramené à la tension d'alimentation)
U^+	tension de la sortie positive (par rapport à la terre)
U^-	tension de la sortie négative (par rapport à la terre)
V_{cc}	tension d'alimentation

En l'absence de sollicitation mécanique et à température ambiante $T_A = 25^\circ\text{C}$, on a : $s = s_{OA}$, l'offset à température ambiante. De même, à haute température $T_H = 70^\circ\text{C}$, on a : $s = s_{OH}$. Le calcul du coefficient en température de l'offset TCO est donné ci-dessous.

$$TCO = \frac{s_{OH} - s_{OA}}{T_H - T_A}$$

TCO	coefficient en température de l'offset
s_{OA}, s_{OH}	offsets à températures "ambiante" et "haute"
T_A, T_H	températures "ambiante" et "haute"

Afin de limiter les erreurs sur la mesure de TCO dues aux contraintes dans le substrat lors de la mesure, l'aspiration de la table chauffante a été remplacée par des bandes adhésives, et seuls des substrats relativement épais (0.8 mm) ont été utilisés. Une erreur résiduelle due aux contraintes dans le substrat, contraintes dues à sa fabrication, aux couches, aux inhomogénéités thermiques lors de la mesure à chaud et aux efforts exercés par les pointes de mesure, peut cependant subsister.

3. Résultats

Les valeurs de l'offset et de TCO après chaque traitement, ainsi que les variations de ces valeurs dues à chaque traitement individuel, sont données aux figures 3–1 (valeurs absolues après chaque traitement) et 3–2 (variations dues à chaque traitement). Le traitement provoquant le plus de variations des ponts de mesure est clairement la cuisson du verrage.

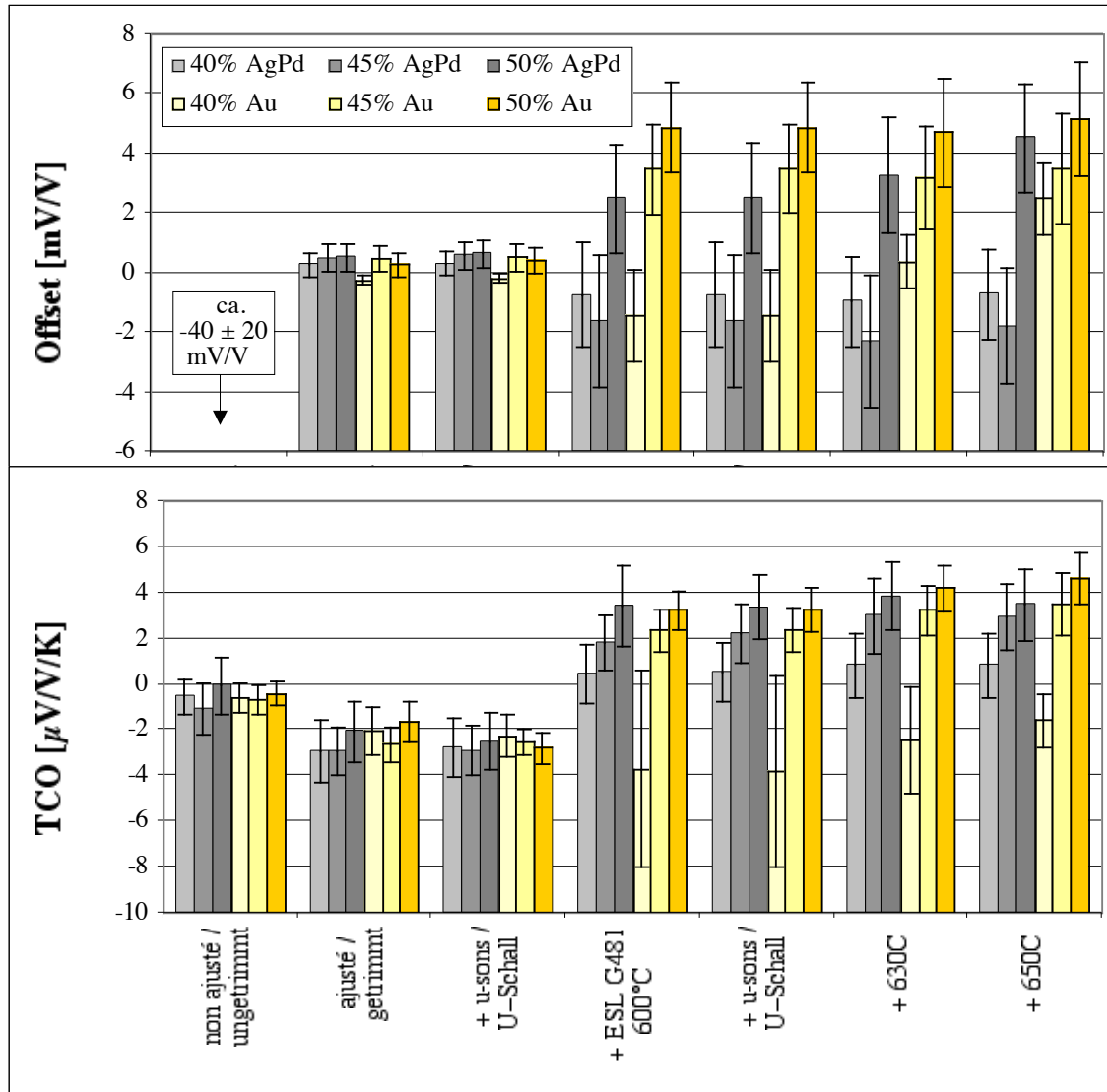


Figure 3–1. Valeurs de l'offset et de TCO ; moyennes ± écarts-types.

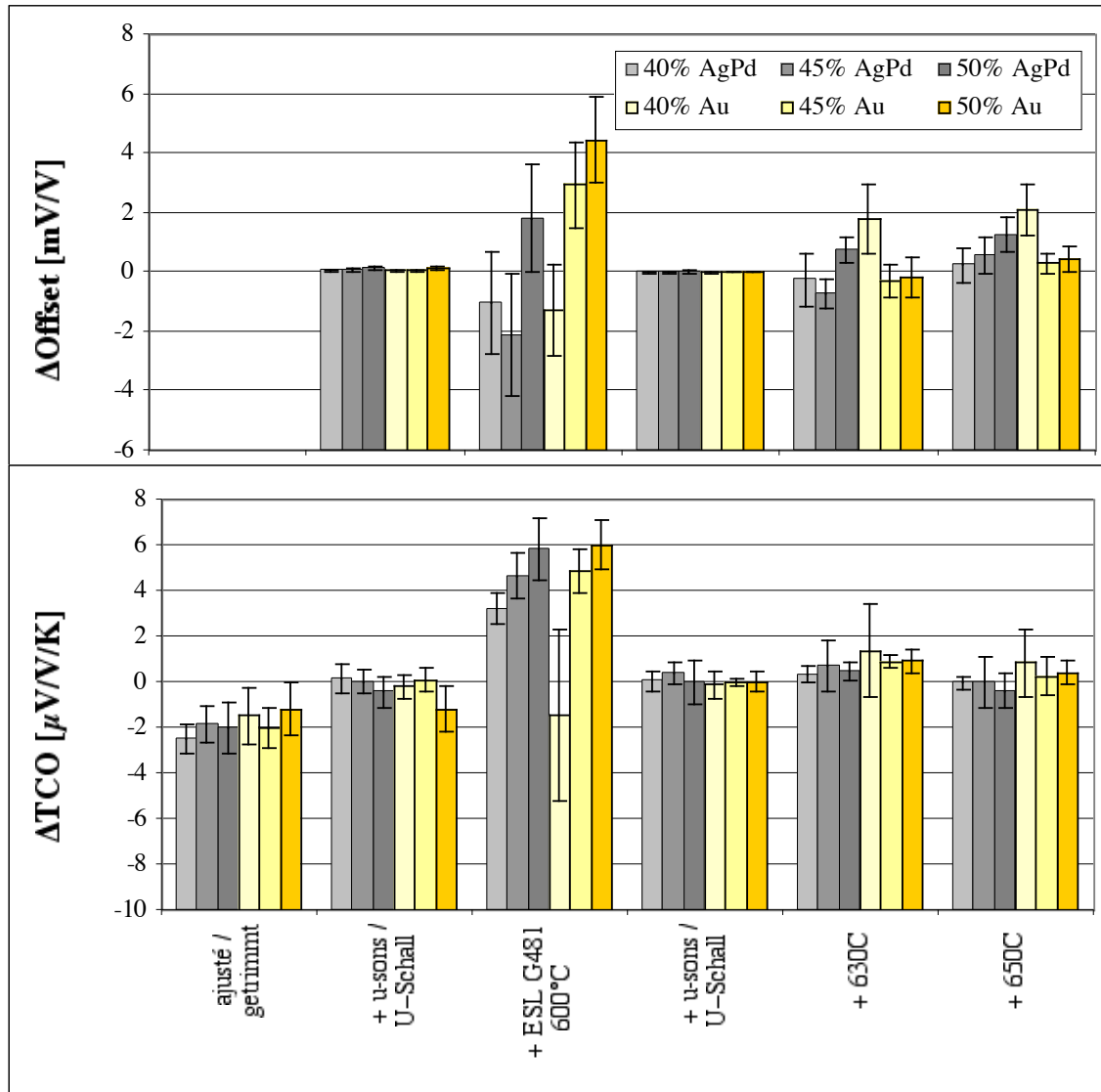


Figure 3–2. Variations, pour chaque traitement, de l'offset et de TCO ; moyennes \pm écarts-types.

Ajustement

L'agrandissement correspondant de la fig. 3-1 est donné à la fig. 3-3 (offset). A première vue, on peut penser qu'on obtient une meilleure précision avec une faible puissance de coupe. Cependant, les valeurs de l'offset devraient être indépendantes des terminaisons, qui ne jouent pas de rôle lors de l'ajustement. Ce n'est clairement pas le cas entre les deux substrats (AgPd et Au) ajustés avec une puissance de 40%. La raison la plus probable de la différence observée entre ces deux substrats est une légère différence d'épaisseur des résistances. Comme il n'est pas souhaitable que l'ajustement soit sensible à ces variations, il vaut mieux ajuster avec une puissance un peu plus élevée.

Les valeurs de *TCO* baissent en général légèrement lors de l'ajustement. On constate peu d'influence du type de terminaison sur cette baisse ; cette baisse indique donc qu'on crée au voisinage de la coupe une zone semi-conductrice, à coefficient de résistivité négatif en température.

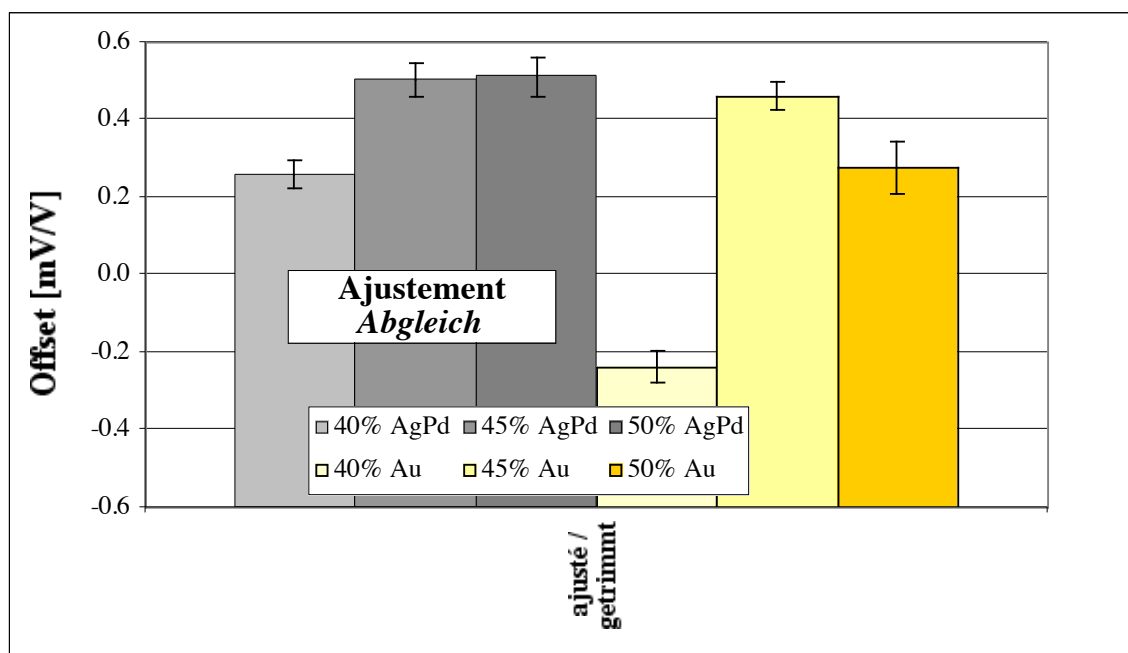


Figure 3-3. Valeurs de l'offset après ajustement, moyennes \pm écarts-types.

Ultrasons

Les traitements aux ultrasons, dans cette étude, servent essentiellement à caractériser la stabilité des ponts de mesure ajustés. A fins de comparaisons, deux traitements (avant et après verrage) ont été effectués. Les variations de l'offset dues à ces traitements sont comparées à la fig. 3-4. La stabilité supérieure des ponts ajustés après verrage apparaît clairement.

A l'état non recouvert de verrage, les ajustements réalisés à puissance élevée dérivent clairement plus, ce qui est compatible avec la supposition que la taille de la zone endommagée dans les résistances augmente avec la puissance de coupe. Cette dépendance est cependant largement supprimée après verrage.

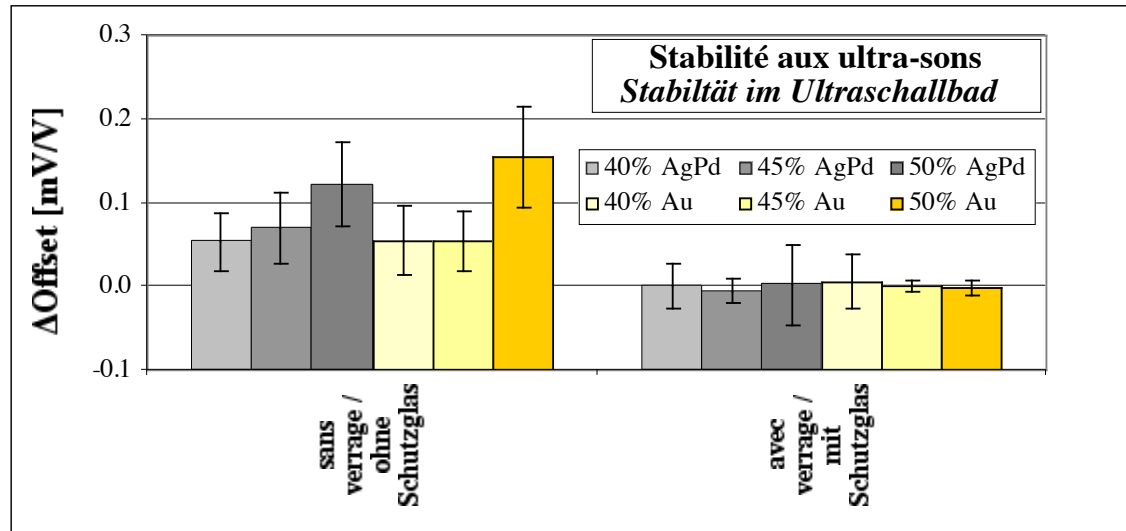


Figure 3–4. Comparaison de la stabilité aux ultra-sons (10 min à pleine puissance), avant et après verrage avec ESL G–481, cuit à env. 600°C.

Verrage

L'étape de cuisson du verrage est clairement celle qui provoque la plus grande variation des caractéristiques. Elle entraîne un effet de comblement de la coupe si la puissance est faible, et d'extension si la puissance est élevée. Dans un cas (40%, Au), les résistances semblent avoir été sous-coupées, alors que la qualité de l'ajustement de ce substrat était la meilleure de tous les échantillons avant verrage : la déposition de verrage semble à priori entraîner une augmentation de l'optimum de puissance de coupe.

L'évolution de l'offset après verrage est largement compatible aux résultats des études précédentes^{1,2} : l'offset tend à augmenter pour les puissances de coupe élevées (accentuation de la coupe), et diminuer pour les puissances de coupe faibles (comblement de la coupe). L'évolution de *TCO* a une dépendance semblable. Les valeurs résultantes sont tout à fait acceptables, et compensables par l'ajustement fin.

L'adhérence du verrage cuit à température nominale de 600°C (en fait, env. 590°C dans ce profil) est très mauvaise au voisinage de la zone coupée (fig. 3–5) ; la liaison entre le verrage et la résistance est gênée par la poussière de résistance qui s'est déposée lors de l'ajustement, et qui n'a pu être enlevée lors du 2^e passage aux ultrasons. Afin de "guérir" ces zones instables, il a donc été procédé à des recuits à des températures supérieures.

Recuits ultérieurs

Les recuits, bien que réalisés à des températures supérieures à celle de cuisson du verrage, n'entraînent que peu de variation des caractéristiques. Le cas "sous-coupé" (40%, Au) constitue une exception : on assiste à un "rattrapage" des problèmes rencontrés avec la cuisson à 600°C lors des recuits ultérieurs, et le résultat final est semblable.

La stabilité mécanique sur les zones contaminées par la poussière de résistance augmente un peu avec le recuit à température nominale de 630°C, et devient optimale après le traitement à 650°C. A ce stade, la couche de verrage est très lisse et compacte (fig. 3–6), et a bien bouché les coupes, contrairement à la cuisson à 600°C.

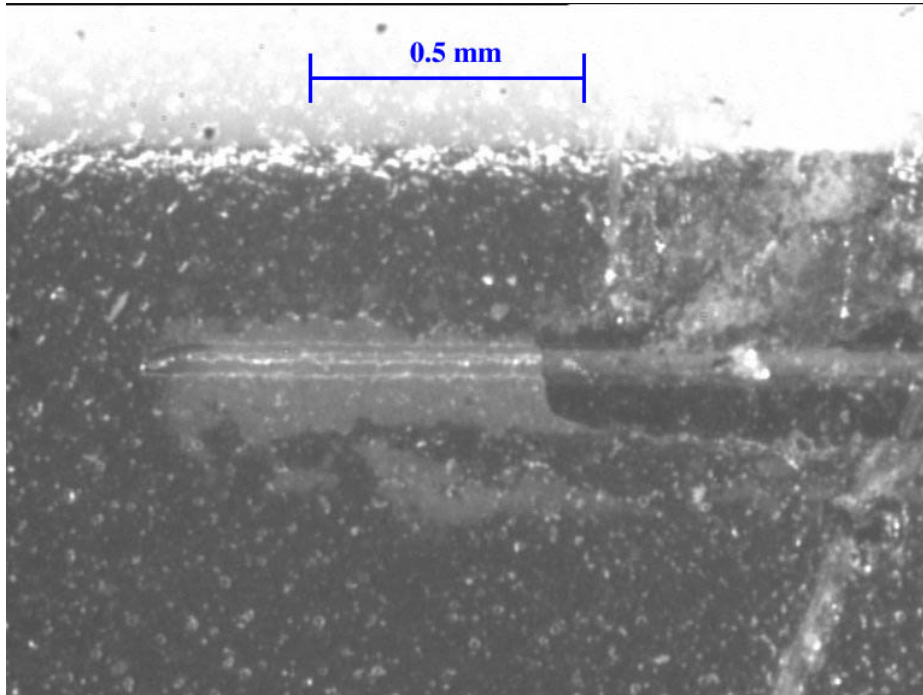


Figure 3–5. Photo d'une résistance ajustée, nettoyée aux ultrasons, et recouverte de verrage cuit à 600°C. La contamination reste suffisante pour gêner l'adhérence du verrage, qui se décolle très facilement si sollicité avec une pointe.

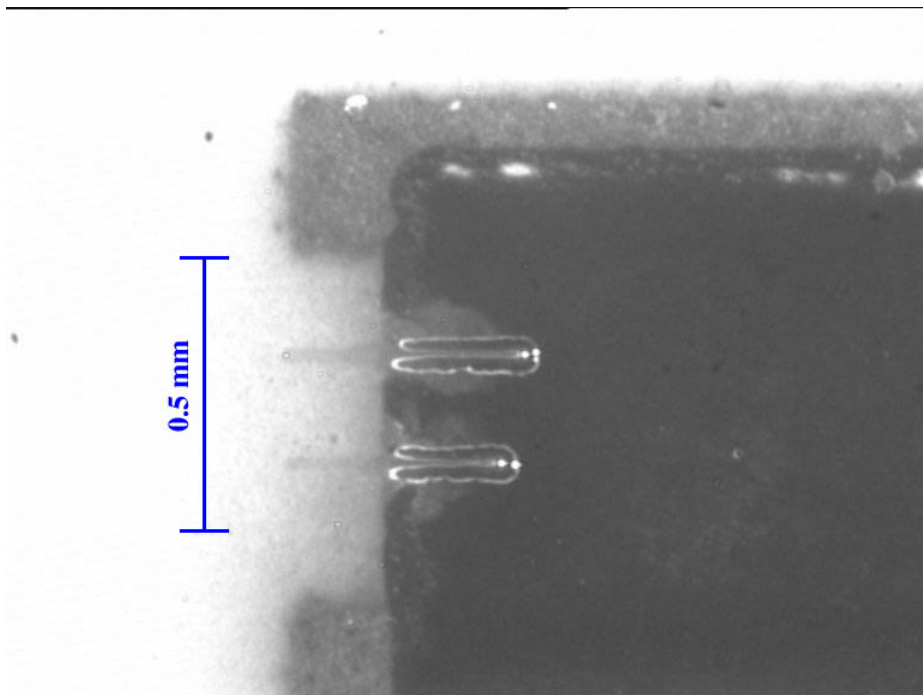


Figure 3–6. Photo d'une résistance préparée dans les mêmes conditions que celle montrée à la fig. 3–5, mais recuite en plus à 630°C et 650°C. Le verrage encapsule bien la coupe, et se montre beaucoup plus lisse, compact et adhérent.

4. Conclusions

Cette étude avait pour but d'étudier la possibilité de stabiliser l'ajustement grossier de l'offset avec le verrage ESL G-481. Les premiers résultats (ultrasons) montrent effectivement une bonne stabilisation. En revanche, un problème d'adhérence du verrage a été constaté, dû à la poussière de résistance générée lors de l'ajustement. Cette poussière n'a pu être enlevée de manière suffisante par le 1^{er} nettoyage à ultrasons. Il est cependant possible de résoudre ce problème en recuisant le verrage à des températures supérieures. A 650°C (au lieu de 600°C), on obtient une excellente encapsulation de la coupe, et les problèmes d'adhérence semblent résolus.

Dans notre cas (monoface) et pour les autres petites poutres ne nécessitant pas d'ajustement ultérieur sur la poutre (MilliNewton, SenCycle) cette solution est satisfaisante. En revanche, elle peut poser quelques problèmes, surtout pour les produits devant subir un ajustement fin après verrage (Huba Control DT400).

- L'absorption différente du rayon laser par le verrage plus dense influence les conditions de coupe.
- Le comportement lors de la coupe des résistances ainsi verrées sera probablement différent, et doit être caractérisé.
- L'influence du verrage et de sa cuisson sur les propriétés mécaniques doit aussi être examinée pour les poutres sérigraphiées sur deux faces.
- Une haute température de cuisson ou de recuit entraîne un coulage plus important, ce qui est désirable pour l'encapsulation de la coupe et l'adhérence, mais désavantageux pour la précision.

Dans les études futures, différentes expériences seront réalisées.

- En premier lieu, on essaiera de cuire le verrage directement à une température un peu plus élevée, par exemple 630°C, ce qui donne en principe un meilleur résultat que des recuits sur un verrage cuit initialement à une température insuffisante.
- On peut aussi déposer du verrage avant et après l'ajustement ; l'adhérence verrage sur verrage est probablement plus facile que verrage sur résistance, pour une température de cuisson donnée. Cette méthode nécessite une sérigraphie supplémentaire, mais permet probablement d'éviter une importante augmentation de la température de cuisson.
- Alternativement, on peut effectuer le verrage à température normale avant la coupe, ajuster, et recuire le tout une 2^e fois à plus haute température. Cette méthode nécessite deux cuissons, mais pas deux sérigraphies. Elle évite les problèmes d'adhérence, vu que la poussière de résistance se dépose alors sur le verrage. En choisissant la température de recuit, on peut trouver un juste compromis entre scellement et budget thermique.
- Finalement d'autres verrages devront être explorés : les autres verrages pour cuisson vers 600°C (Her IP9029H, DP QQ600), ainsi que les verrages se cuisant vers 500°C (ESL G-471, Her IP9025, DP 9137, DP QQ550). Ces derniers permettent de travailler avec un budget thermique réduit, même si on doit légèrement augmenter leur température de cuisson. En revanche, leur stabilité chimique est moindre, et leur toxicité (présence de Cd!) plus élevée.