

Ajustement et verrage de poutres monofaces (2)

Etude de l'ajustement de poutres monofaces, et de sa stabilisation par verrage et recuit (2).

Studie des Abgleichs einseitiger Biegebalken, und derer Stabilisierung durch Schutzglas und Wärmebehandlung (2).

Thomas Maeder, 6.6.2001

Projets : MilliNewton / ajustement.

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

Table des matières

1. Introduction	2
2. Expériences	2
3. Résultats	5
4. Conclusions	9

Résumé

La stabilisation par verrage de ponts de mesure ajustés a été examinée, en utilisant différentes procédures. La procédure la plus simple (ajustement, puis verrage) nécessite une élévation considérable (+80 K) de la température de verrage, ce qui altère plus fortement l'ajustement. Les autres procédures (verrage, ajustement, 2^e verrage ou verrage, ajustement, recuit) nécessitent deux cuissons, mais permettent en principe des cuissons à des températures plus basses.

Kurzfassung

Die Stabilisierung abgeglichener Messbrücken durch Verglasung, mit verschiedenen Methoden, wurde hier studiert. Die einfachste Methode (Abgleich, dann Verglasung) benötigt eine bedeutende (+80 K) Erhöhung der Einbrenntemperatur des Glases was den Abgleich stärker beeinträchtigt. Die andere Methoden (Verglasung, Abgleich, 2. Verglasung oder Verglasung, Abgleich, 2. Einbrand) benötigen 2 Einbrände, erlauben aber tieferen Einbrenntemperaturen.

1. Introduction

La protection de l'ajustement grossier de ponts de mesure par verrage est une méthode potentiellement efficace pour en augmenter la stabilité. Dans la précédente étude¹, on a effectivement constaté, lors d'un passage au bac à ultrasons, une altération nettement moindre des ponts ajustés recouverts de verrage par rapport aux ponts où l'ajustement est laissé brut. En revanche, l'adhérence du verrage cuit de manière standard est problématique au voisinage de la coupe en raison de la poussière de résistance générée lors de l'ajustement. Pour garantir l'adhérence, il faut augmenter la température de cuisson d'env. 50°C, ce qui augmente la dispersion sur l'offset et le *TCO* après verrage.

Dans le présent travail, on se propose d'étendre le champ d'investigation de l'étude précédente.

- On se propose d'étudier l'effet la température de recuit du verrage.
- Le verrage ESL G-481 est comparé à titre exploratoire à un autre : Her IP9029H.
- En plus de la procédure consistant à ajuster, puis recouvrir de verrage, deux autres procédures sont étudiées : 1) verrage, ajustement, puis 2^{ème} verrage; et 2) verrage, ajustement et recuit.
- La cuisson du verrage se déroulera sur supports, et l'effet de l'orientation (face sérigraphiée dessus ou dessous) sera examiné. Cette expérience constitue une qualification préliminaire pour l'ajustement et verrage de poutres sérigraphiées sur les deux faces (MilliNewton, SenCycle).
- L'effet sur l'adhérence du verrage près de la zone coupée d'un meilleur nettoyage (au pinceau) sera examiné.

2. Expériences

Echantillons et procédures de verrage

15 substrats de 0.8 mm d'épaisseur, en Al₂O₃ 96%, ont été sérigraphiés avec le pont monoface. Les conditions de sérigraphie et de cuisson (sauf le verrage), ainsi que le plan du substrat et le type d'ajustement sont donnés ailleurs^{1,2}. En revanche, on varie ici les conditions de verrage, en utilisant 3 procédures (a, b, c). La description détaillée des étapes de préparation est donnée au tableau 2–I, et la liste des échantillons au tableau 2–II.

- a) Ajustement, puis verrage (la plus étudiée ici).
- b) Verrage cuit à température modérée, ajustement, puis verrage une 2^e fois à température plus élevée.
- c) Verrage cuit à température modérée, ajustement, puis recuit (sans déposer une 2^e couche).

Etape	Description	(a)	(b)	(c)
1	Ajustement de l'offset du pont par coupe laser (a)	√	-	-
2	Nettoyage aux ultrasons	√	√	√
3	Sérigraphie du verrage (1 ^e couche)	√	√	√
4	Cuisson du verrage (1 ^e fois)	√	√	√
5	Ajustement de l'offset du pont par coupe laser (bc)	-	√	√
6	Nettoyage aux ultrasons	-	√	√
7	Sérigraphie de la 2 ^e couche de verrage	-	√	-
8	2 ^e cuisson ou recuit	-	√	√

Tableau 2–I. Description des 3 procédures de verrage utilisées (a, b, c).

¹ Rapport "Ajustement et verrage de poutres monofaces", T. Maeder, 4.3.2001.

² Rapport "Offset et coefficient en température de poutres monofaces en fonction de la procédure de sérigraphie et des terminaisons", T. Maeder, 2.3.2001.

No	Termi- naisons	Procé- dure	Verrage	1 ^e cuisson	2 ^e cuisson / recuit
01-726	Ag:Pd	(a)	ESL G-481	ESL_700 SU	-
01-727	Ag:Pd	(a)	ESL G-481	ESL_680 S	-
01-728	Ag:Pd	(a)	ESL G-481	ESL_700 S	-
01-729	Au	(a)*	ESL G-481	ESL_680 S	-
01-730	Au	(a)	ESL G-481	ESL_700 S	-
01-731	Au	(a)	ESL G-481	ESL 680 S	-
01-732	Ag:Pd	(b)	ESL G-481	ESL_600 S + ESL_630 S	ESL_650 S
01-733	Ag:Pd	(b)	ESL G-481	ESL_630 S	ESL_680 S
01-734	Au	(c)	ESL G-481	ESL_630 S	ESL_650 S (2x)
01-735	Au	(c)	ESL G-481	ESL_630 S	ESL_680 S
01-736	Au	(c)	ESL G-481	ESL_630 S	ESL_700 S
01-740	Ag:Pd	(a)†	Her IP9029H	ESL_650 S	-
01-741	Ag:Pd	(a)†	Her IP9029H	ESL_630 S	-
01-742	Au	(a)†	Her IP9029H	ESL_680 S	-
01-743	Au	(a)	Her IP9029H	ESL_700 S	-

Tableau 2-II. Paramètres des différents échantillons.
Cuisson : S = sur supports et U = orienté contre le bas.
* nettoyé au pinceau après ultrasons.
† ajusté 2x - échantillons de moindre qualité.

Ajustement et nettoyage aux ultrasons

Les paramètres d'ajustement laser, donnés au tableau 2-III, ont été légèrement retouchés par rapport à l'étude précédente¹, afin d'obtenir des coupes un peu plus rapides et d'augmenter légèrement la 1^e coupe au dépens de la 2^e, ce qui devrait améliorer un peu la précision. Après ajustement, les substrats sont nettoyés aux ultrasons (réglage : 140%, 10 min) dans de l'isopropanol.

Type de coupe	double I, avec 0.2 mm de distance entre les 2 coupes
Puissance	45%
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 : -7.0 mV/V ralentissement : -4.0 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.

Sérigraphie et cuisson / recuit du verrage

Le verrage est sérigraphié mince (400 *mesh* / 20 μm), ce qui permet aussi de limiter la surépaisseur due à la zone de diélectrique³. Les réglages du four pour la cuisson ou le recuit sont donnés au tableau 2–IV, et sont dérivés du profil de cuisson donné par ESL du verrage ESL G–481. Dans cette étude, toutes les cuissons ont été réalisées sur des supports assurant une distance d'env. 1 cm entre le substrat et la bande du four. Cette disposition a été choisie car elle est compatible avec les circuits double face (MilliNewton et SenCycle). Dans cette même optique, un échantillon (01–726) a été cuit avec la face sérigraphiée contre le bas (tous les autres : vers le haut).

Réglage	Température atteinte (bande) [°C]	Température atteinte (supports) [°C]	Vitesse de bande [cm/min]	Zone 1 [°C]	Zone 2 [°C]	Zone 3 [°C]	Zone 4 [°C]	Zone 5 [°C]	Zone 6 [°C]
ESL_600	580	565*	8.67	320	500	595	603	610	625
ESL_630	610*	595*	8.67	350	530	625	633	640	655
ESL_650	635*	620*	8.67	350	550	645	653	660	675
ESL_680	665	650	8.67	360	580	675	683	690	703
ESL_700	685*	670*	8.67	385	600	695	703	710	725

Tableau 2–IV. Réglages du four Sierratherm de l'IPM pour les différentes températures nominales, et températures correspondantes atteintes (plateau d'env. 10 min) effectivement, directement sur la bande et sur supports. Dans cette étude : cuisson et recuit du verrage sur supports uniquement.

* : valeurs interpolées ou extrapolées.

Mesures

Les conditions de mesure et les calculs correspondants sont donnés dans l'étude précédente¹. Tous les offsets s_O sont ramenés par calcul à 25°C, afin de s'affranchir des variations de la température ambiante et du temps de refroidissement de la plaque. Dans cette étude, $T_H = 80^\circ\text{C}$ et T_A varie entre 23°C et 29°C.

$$s_O = s_{OA} + TCO \cdot (T_A - 25^\circ\text{C})$$

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

TCO	coefficient en température de l'offset, calculé entre T_A et T_H
s_{OA}, s_{OH}	offsets à températures "ambiante" et "haute"
T_A, T_H	températures "ambiante" et "haute"
s_O	offset nominal, ramené à 25°C

³ Rapport "Offset et coefficient en température des prototypes de poutres monofaces, non ajustées", T. Maeder, 16.1.2001.

3. Résultats

3.1. Ponts de mesure non ajustés - stabilité aux ultrasons

La variation de l'offset et du *TCO* des ponts de mesure non ajustés et non verrés lors d'un passage au bac à ultra-sons n'est pas significative (fig. 3-1). Ce résultat est semblable à celui obtenu sur des ponts ajustés et recouverts de verrage. Inversement, les ponts ajustés mais non protégés sont nettement moins stables¹.

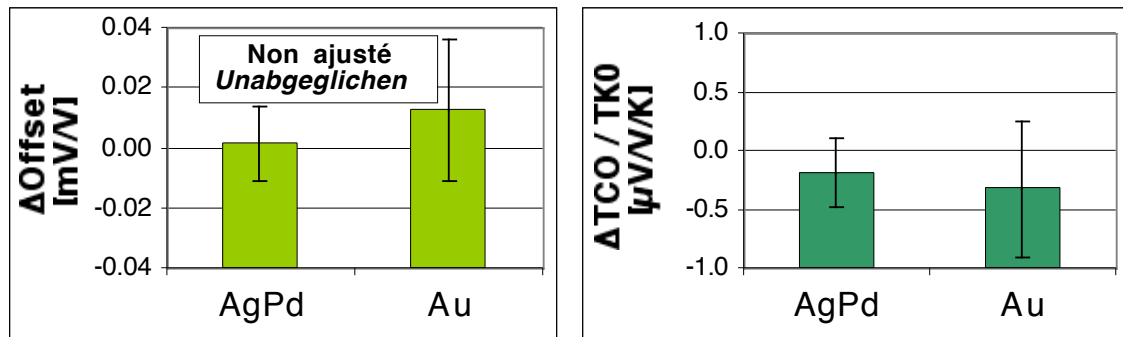


Figure 3-1. Stabilité au passage dans le bac à ultrasons (10' à pleine puissance) des cellules monofaces non ajustées (moyennes \pm écarts-types). AgPd = 01-732 et 01-733; Au = 01-734 à 01-736.

3.2. Ponts de mesure non ajustés - variation au verrage

L'effet du verrage sur l'offset des ponts non ajustés (fig. 3-2) est très faible, bien que l'effet du verrage ESL G-481 sur *une résistance individuelle* DP 2041 non ajustée soit plus important⁴. Sur *un pont de mesure* non ajusté, on s'attend à des variations beaucoup plus faibles que celles de ses résistances individuelles, d'autant plus faibles que le verrage influence uniformément toutes les résistances.

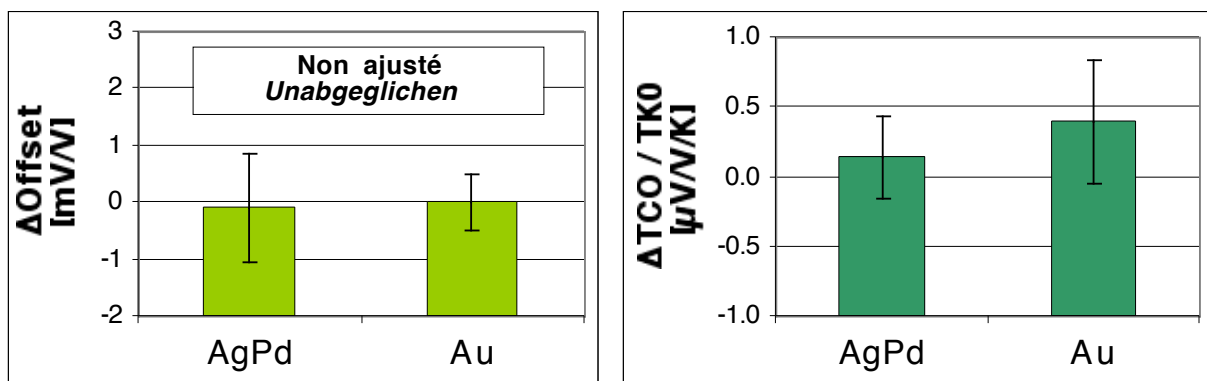


Figure 3-2. Variation au verrage (ESL G-481, profil ESL_630, env. 10' à 595°C) de l'offset et du *TCO* de ponts de mesure non ajustés.

⁴ Rapport "Effet de couches protectrices sur les résistances Du Pont 20x1", T. Maeder, 4.7.2000.

3.3. Ponts ajustés : type de verrage et température de cuisson (a)

Ici, on examine – procédure (a) : ajustement, puis verrage – l'influence du type de verrage et de sa température de cuisson. Les valeurs de l'offset et du TCO correspondantes, après ajustement et verrage, sont données à la fig. 3–3 (terminaisons : AgPd).

- Le décalage de l'offset et son écart-type augmente avec la température de cuisson du verrage, du moins au-delà de 650°C. Comme on considère que la dispersion de l'offset après verrage devrait être de l'ordre de grandeur du span (env. 2 mV/V max.), les valeurs obtenues sont un peu (facteur 2–3) trop élevées. La forme des résistances ajustées et leur petite taille est ici probablement en cause. Un autre facteur probable est la mauvaise focalisation du laser, en raison d'un conflit entre la distance focale du laser et celle de la caméra, problème qui a entre temps été résolu.
- La dispersion du TCO augmente aussi, ce qui est défavorable pour les capteurs à bas coût non ajustés en température.
- L'adhérence aux basses températures est insuffisante au voisinage de la zone de coupe, en raison de la poussière de résistance s'y déposant (v. rapport précédent). La température minimale de cuisson semble être 650°C (profil ESL_680 sur supports) pour les deux types de verrage. C'est le défaut majeur de la procédure de stabilisation (a), qui consiste à déposer le verrage sur les résistances après ajustement. Il conviendrait d'examiner la possibilité d'effectuer des nettoyages plus poussés, par exemple avec des bains à ultrasons plus puissants.
- Les deux verrages ont un aspect semblable, mais Her IP9029H tend plus à former des bulles.

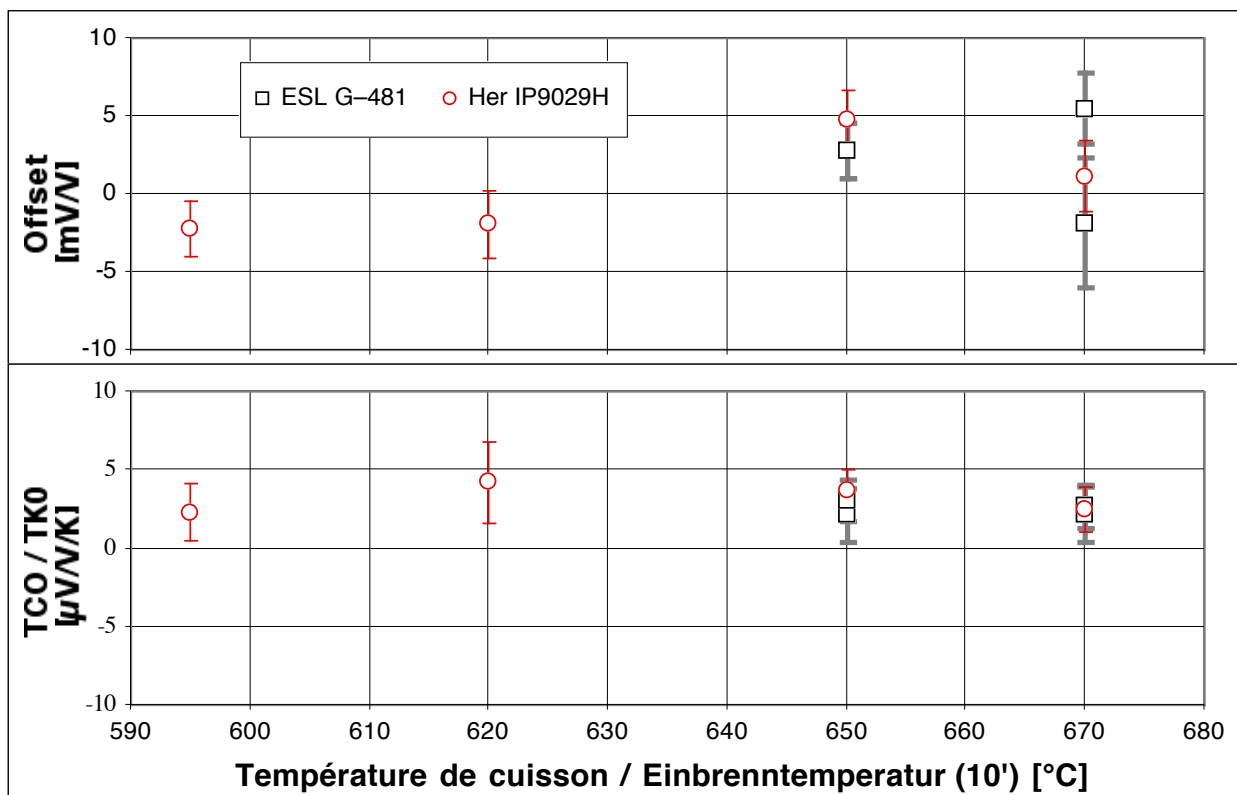


Figure 3–3. Offset et TCO après ajustement et verrage (procédure a), en fonction de la température de cuisson et du type de verrage.

3.4. Procédure de stabilisation utilisée

Les valeurs de l'offset et du *TCO*, après ajustement et stabilisation, sont données à la fig. 3–4 (toutes terminaisons confondues), en fonction de la procédure d'ajustement et de la température de cuisson.

- Qualitativement, les procédures (b) et (c) semblent meilleures du point de vue *TCO* que (a).
- Les procédures (b) et (c) ne souffrent pas des problèmes d'adhérence constatés avec (a). Dans le cas de (b), le fait que la poussière générée par l'ajustement est englobée entre deux couches de verrage, et qu'elle contienne elle-même du verrage (ce qui abaisse son point de fusion) sont probablement les raisons de la disparition des problèmes d'adhérence.
- Au niveau de l'offset, on ne peut pas vraiment constater de différences significatives entre les différentes procédures à température de cuisson ou de recuit égale – il faudrait pour cela plus d'échantillons. Cependant, les procédures (b) et (c) nécessitent en principe des températures de cuisson plus faibles pour garantir une bonne adhérence, et altèrent donc en fin de compte moins l'ajustement du pont.
- En revanche, (b) et (c) nécessitent deux cuissons. De plus (b) nécessite deux couches de verrage, et la coupe est plus exposée avec (c).

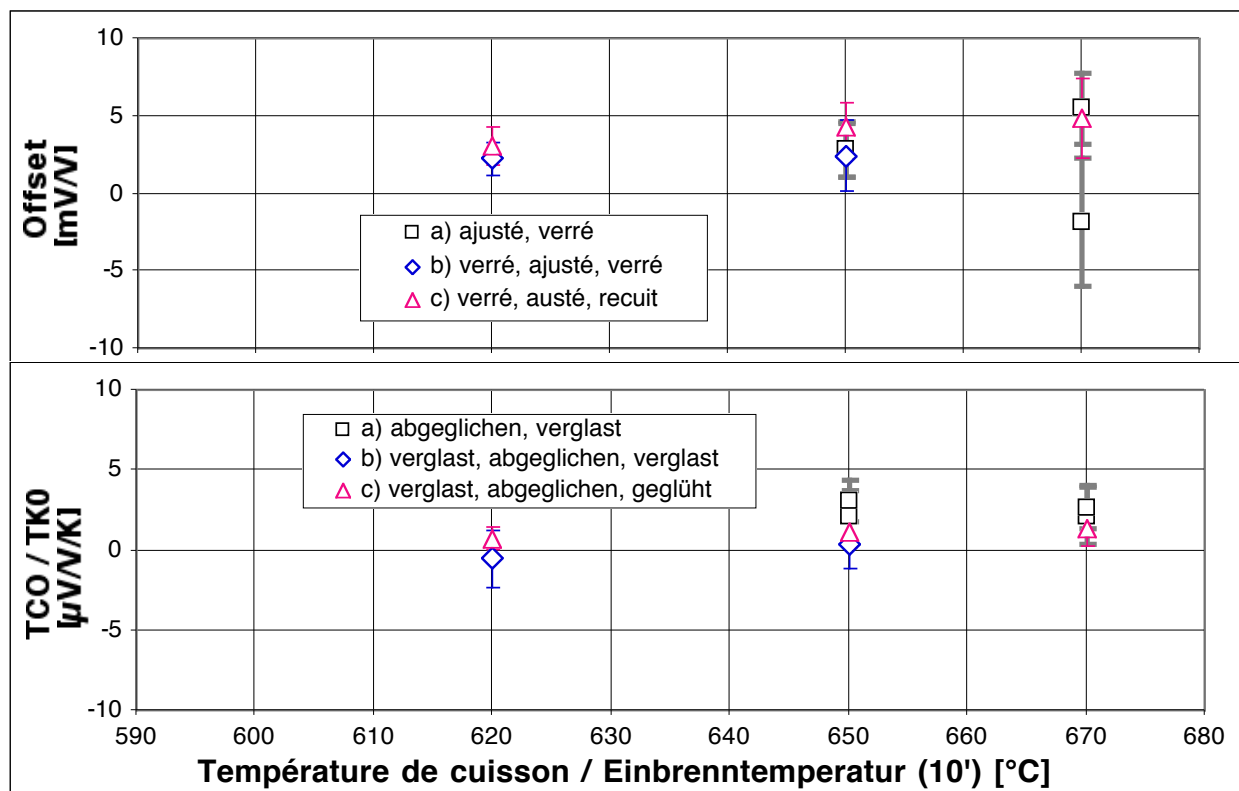


Figure 3–4. Offset et *TCO* après ajustement et stabilisation, en fonction de la procédure de stabilisation et de la température de cuisson.

3.5. Orientation sur les supports

L'effet de l'orientation sur les supports (AgPd, ESL_700 / 670°C, procédure a) est donné à la fig. 3-5. Étant donné la dispersion, les différences constatées sont faibles.

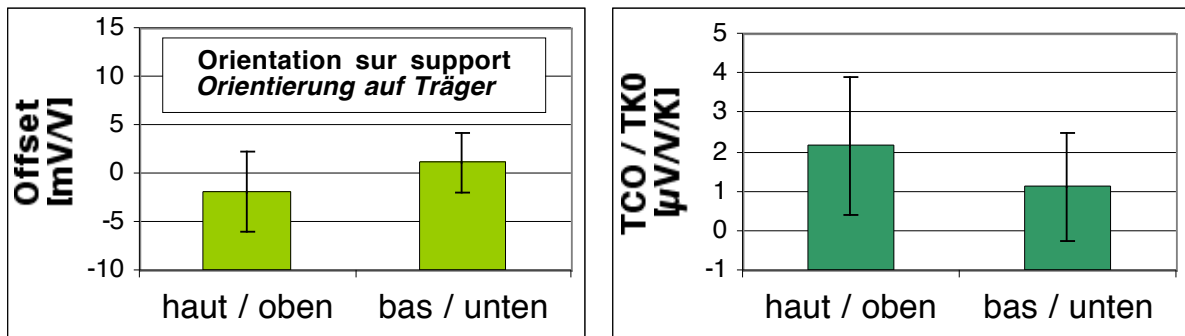


Figure 3–5. Effet de l'orientation sur le support (face contre le haut ou contre le bas) sur l'évolution au verrage. Terminaisons : AgPd ; température de cuisson : 670°C ; procédure (a).

3.6. Nettoyage additionnel au pinceau

L'effet d'un nettoyage additionnel du substrat au pinceau après ajustement (Au, ESL_680, 650°C, procédure a) est donné à la fig. 3–6. Étant donné la dispersion, les différences constatées sont faibles, mais l'offset semble migrer plus vers le haut (*overshoot*) pour l'échantillon nettoyé au pinceau.

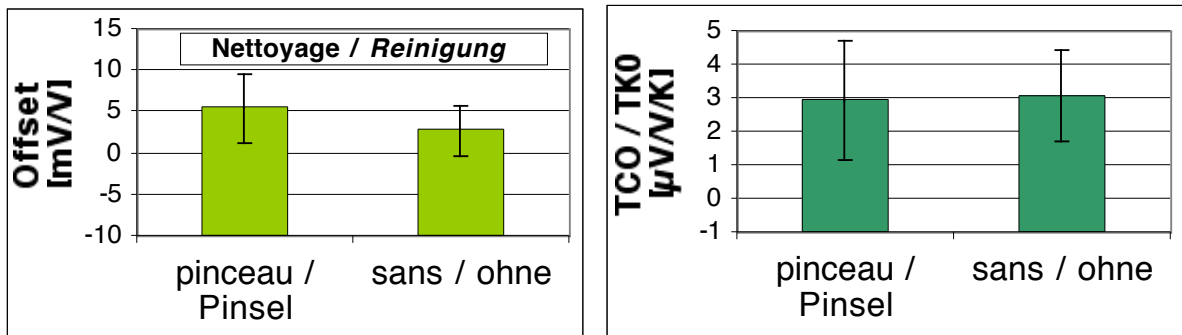


Figure 3–6. Effet du nettoyage au pinceau sur l'évolution totale (nettoyage + verrage). Terminaisons : Au; température de cuisson : 650°C ; procédure (a).

4. Conclusions

Cette étude avait pour but d'étudier plus en détail la stabilisation par verrage de l'ajustement grossier de l'offset. Trois procédures de stabilisation ont été étudiées.

- a) **Ajustement, puis verrage.** C'est la procédure classique, la plus simple, qui ne réclame qu'une cuisson. Cependant, en raison de la poussière de résistance qui se redépose près de la coupe, l'adhérence du verrage est gênée, et la température de cuisson du verrage doit être augmentée considérablement (+50°C) pour pallier à ce problème. Dans le futur, un nettoyage par ultrasons plus énergique permettra peut-être de diminuer la température de cuisson du verrage.
- b) **Verrage, ajustement, puis verrage à nouveau.** Cette procédure est plus complexe, mais permet une "encapsulation" de la poussière générée lors de l'ajustement entre deux couches de verrage. De plus, cette poussière est maintenant un mélange résistance + verrage. Ces deux facteurs diminuent la température de cuisson nécessaire à une bonne intégrité mécanique, ce qui diminue l'évolution de l'offset et celle du *TCO*.
- c) **Verrage, ajustement, puis recuit.** Cette procédure est similaire à (b), mais on s'épargne la sérigraphie de la 2^e couche de verrage. Aucun problème d'adhérence n'est possible, puisque la poussière se dépose *sur* le verrage. En revanche, l'encapsulation de la coupe est potentiellement moins bonne.

L'évolution de l'offset et du *TCO* est très faible pour les températures minimales présumées nécessaires aux procédures (b) et (c) – env. 620°C. Pour la procédure (a), qui nécessite env. 650°C, cette évolution est env. 2–3 fois plus importante. La plupart de l'évolution de l'offset et du *TCO* est imputable à l'ajustement. En effet, les ponts non ajustés évoluent très peu au verrage.

Pour les applications de type DT400, où d'autres ajustements doivent être effectués ultérieurement, la procédure (c) permet de limiter fortement le budget thermique, car aucun problème d'adhérence n'est possible. On est donc libre de trouver le meilleur compromis entre budget thermique / aspect du verrage et stabilité. Une variante de cette procédure à tester serait d'ajuster avec le verrage seulement séché, ce qui permettrait de n'effectuer qu'une cuisson.

Les études ultérieures devront se concentrer sur la stabilité des ajustements obtenus, ainsi que sur l'effet de la température de cuisson du verrage sur les propriétés mécaniques des poutres.