

Stabilité au verrage de résistances ajustées - résultats préliminaires (2)

2^{ème} étude préliminaire de l'effet du processus de verrage (ESL G-481, env. 600°C) sur des résistances ajustées au laser : extension à Du Pont 2021 (100 Ω), 2031 (1 kΩ), 2051 (100 kΩ) et ESL 2612 (PTC).

2. Vorstudie des Einflusses der Verglasung (ESL G-481, ca. 600°C) auf lasergetrimmte Widerstände : Du Pont 2021 (100 Ω), 2031 (1 kΩ), 2051 (100 kΩ) und ESL 2612 (PTC).

Thomas Maeder, 15.1.2001

Projets: TEPLAZID - ajustement.

Mots-Clefs: ajustement capteurs, stabilité, trim, découpe laser, verrage.

Table des matières

1. Introduction	2
2. Expériences	2
3. Résultats	5
4. Conclusions	14

Résumé

La stabilisation d'un ajustement grossier par verrage (ESL G-481, cuisson vers 600°C) est possible sans trop en affecter la qualité, mais requiert un réglage assez fin de la puissance laser. Une puissance trop faible entraîne un "comblement" électrique de la coupe lors du passage dans le four. Inversement, une puissance trop élevée endommage la résistance et entraîne une croissance ultérieure de sa valeur. L'effet de cet endommagement peut en revanche être minimisé en utilisant des résistances relativement grandes et des coupes peu agressives.

Kurzfassung

Die Stabilisierung eines Grobabweichs mit Schutzglas (ESL G-481, Einbrand um 600°C), ohne aber die Qualität des Abgleichs allzusehr zu beeinträchtigen, erwies sich als möglich. Die Laserleistung muss aber relativ fein eingestellt werden. Ist sie zu niedrig, "schliesst" sich elektrisch der Trimmchnitt während dem Ofendurchlauf, ein Effekt, der durch das Glas verursacht wird. Ist dagegen die Laserleistung zu hoch, wird der Widerstand beschädigt, und sein Wert wächst während dem Ofendurchlauf. Dies kann aber durch den Einsatz relativ grösser Widerstände und wenig aggressiver Trimmchnitte minimisiert werden.

1. Introduction

Cette étude préliminaire constitue l'extension à d'autres valeurs des mesures déjà réalisées¹ sur les résistances 10 k Ω Du Pont (DP) 2041, ajustées puis recouvertes de verrage. Cette nouvelle étude porte sur les compositions DP 2021 (100 Ω), DP 2031 (1 k Ω), DP 2051 (100 k Ω), et ESL 2612 (PTC, env. 100 Ω et 2300 ppm/K). Dans l'optique de l'étude systématique qui va être réalisée, s'agit ici de s'assurer que la gamme de puissances d'ajustement laser choisies englobe bien les puissances optimales, et cela pour toutes les compositions résistives étudiées.

2. Expériences

Substrats

Les substrats sont en alumine "standard" 96% (Kyocera A-476, Haldemann & Porret), d'épaisseur 0.64 mm.

Circuit et pâtes

Le circuit "test patterns" est utilisé ici. Il a comme caractéristiques principales:

- Largeur de résistances 0.6 et 1.5 mm.
- Longueur de résistances 0.3, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5, 2.5 et 5.0 mm.
- 2 niveaux (a et b) de conducteurs (terminaisons des résistances), usuellement AgPd et Au.
- 4 zones équivalentes par substrat = 4 (8 = 4 * 2 pour la longueur 0.8 mm) résistances nominale-ment identiques par substrat.

Cuisson

Les substrats ont été cuits posés directement sur la bande du four Sierratherm de l'IPM (résistances vers le haut). Le profil standard « 30MN_PR » a été utilisé pour les terminaisons et résistances (3 cuissons). Ce profil donne un pic d'env. 10 min à 850°C. Le verrage ESL G-481 a été cuit selon le profil "ESL_600" (env. 10 min à 590°C). Les réglages correspondants du four sont donnés au tableau 2-I ci-dessous.

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	590	8.67	320	500	595	603	610	625

Tableau 2-I. Réglages du four Sierratherm pour les profils utilisés.

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

Echantillons

Contrairement à l'étude précédente¹, les substrats utilisés dans cette étude sont en bon état. De plus, les résistances ont ici toujours été sérigraphiées en utilisant le masque standard, c'est-à-dire 325 *mesh* / 40 μm . Dans le cas de DP 20x1, les résistances ont des terminaisons riches en argent : ESL 9912 (Ag) et ESL 9695 (Ag:Pd 25:1). Les terminaisons pour ESL 2612 sont les terminaisons "standard" Du Pont, à savoir DP 5104 (Ag:Pd 3:1) et DP 5744 (Au).

Un substrat par composition a été ajusté, puis recouvert de verrage ESL G-481. On a ici toujours effectué les mêmes opérations et dans le même ordre, à savoir : ajustement (T), sérigraphie du verrage (V), puis cuisson du verrage (F).

Les paramètres des 4 *test patterns* étudiés sont donnés au tableau 2-II. Notons au passage que l'effet du verrage sur les résistances DP 20x1 non ajustées a déjà été étudié², mais pas avec les terminaisons riches en Ag.

No	Résistances (trame / émulsion en <i>mesh</i> / μm)	Terminaison a	Terminaison b	Séquence
99-089	DP 2021 (200 / 30)	ESL 9912 (Ag)	ESL 9695 (Ag:Pd 25:1)	TVF
99-091	DP 2031 (325 / 20)	ESL 9912 (Ag)	ESL 9695 (Ag:Pd 25:1)	TVF
99-073	DP 2051 (325 / 20)	ESL 9912 (Ag)	ESL 9695 (Ag:Pd 25:1)	TVF
00-001	ESL 2612 (200 / 30)	DP 5104 (Ag:Pd 3:1)	DP 5744 (Au)	TVF

Tableau 2-II. Liste des échantillons. T = ajustement (trim); V = déposition de verrage; F = passage au four.

Ajustement des résistances

La plupart des résistances ont été ajustées à 2x leur valeur selon le même schéma que l'étude précédente¹, ce qui permet de mettre facilement en évidence une instabilité éventuelle de l'ajustement. Suivant la géométrie des résistances (longueur et largeur), différents types de coupes, schématisés à la fig. 2-1, ont été étudiés. En plus des 4 types classiques "I", "I2", "I3" et "L", deux types spéciaux, "X" et "P", ont été examinés, afin d'étudier plus en détail les phénomènes associés à la coupe dans une résistance.

- "I". Coupe simple à travers la résistance.
- "I2" et "I3". Plusieurs coupes alternées à travers la résistance.
- "L". Coupe en L, à travers, puis le long de la résistance.
- "X". On coupe à travers toute la résistance, afin d'obtenir un circuit ouvert. Ce type permet de déterminer si la puissance de coupe est suffisante, et si la coupe tend à se "refermer" électriquement lors du verrage.
- "P". On réalise, sur une résistance large, 4 coupes parallèles le long de la résistance. Ce type de coupe permet d'étudier l'altération de la résistance au voisinage d'une coupe laser (effet de bord), et comment cette altération évolue lors du verrage de la résistance.

² Rapport "Effet de couches protectrices sur les résistances Du Pont 20x1", Thomas Maeder, 4.7.2000.

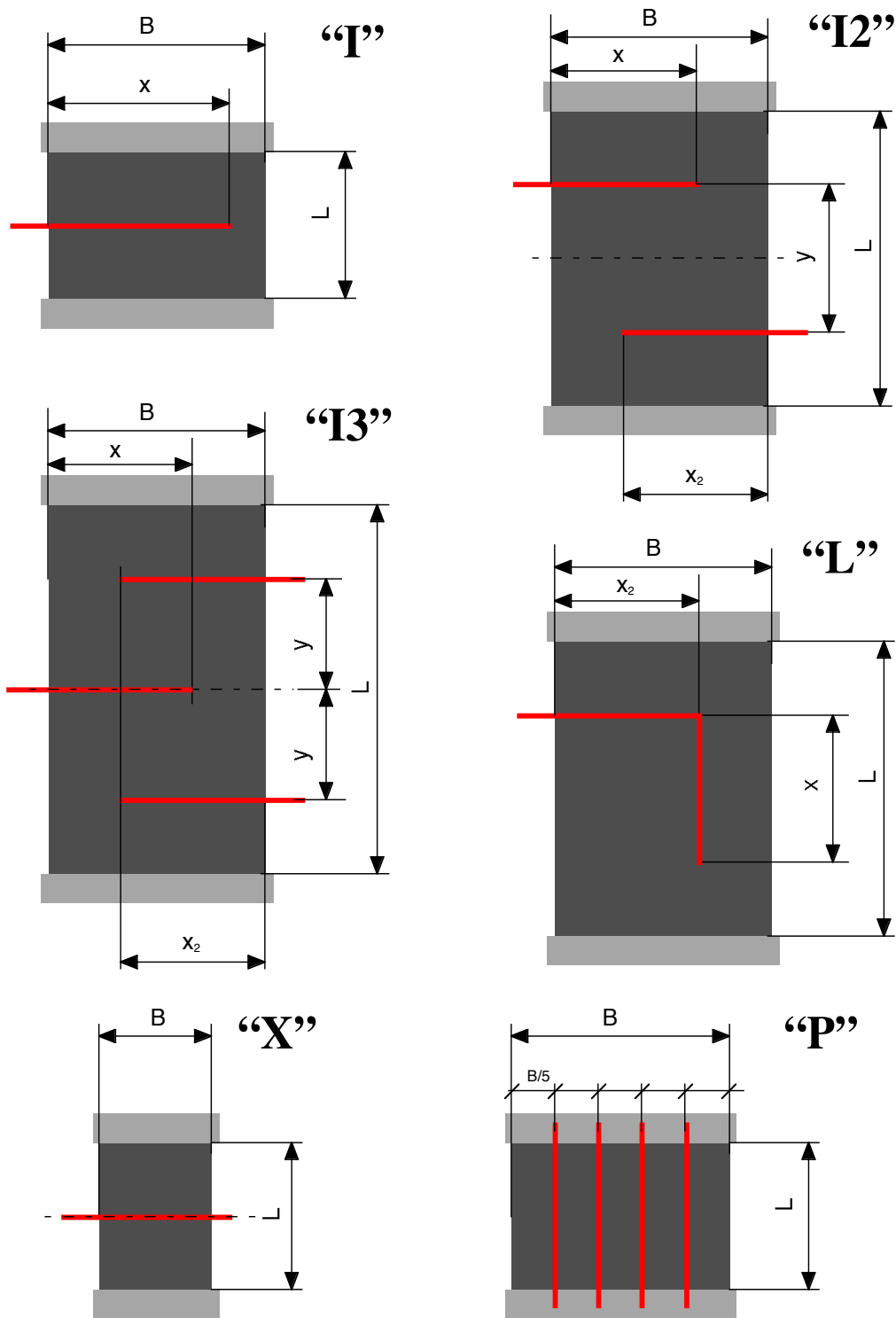


Fig. 2-1. Les différents types de coupe utilisés et leurs paramètres.

Le type et les paramètres de coupe sont donnés, pour chaque résistance, au tableau 2–III.

Nos	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Coupe	Paramètres (voir fig. 2–1) x varié pour atteindre la valeur désirée
R1-1 et R10-1	0.3	0.6	I	(coupe à mi-longueur)
R2-1 et R11-1	5.0	0.6	L	$x_2 = 0.4$ mm (2/3 B) ; $y = 0.3$ mm
R3-1 et R12-1	0.4	0.6	I	(coupe à mi-longueur)
R4-1 et R13-1	1.0	0.6	I3	$x_2 = 0.3$ mm ; $y = 0.3$ mm
R5-1 et R14-1	0.8	0.6	I2	$x_2 = 0.4$ mm ; $y = 0.4$ mm
R6-1 et R15-1	1.5	0.6	L	$x_2 = 0.4$ mm (2/3 B) ; $y = 0.2$ mm
R7-1 et R16-1	0.8	0.6	X	(coupe complète à mi-longueur)
R8-1 et R17-1	0.6	0.6	I2	$x_2 = 0.35$ mm ; $y = 0.2$ mm
R9-1 et R18-1	2.5	0.6	L	$x_2 = 0.4$ mm (2/3 B) ; $y = 0.3$ mm
R1-2 et R10-2	0.3	1.5	I	(coupe à mi-longueur)
R2-2 et R11-2	5.0	1.5	L	$x_2 = 1.0$ mm (2/3 B) ; $y = 0.3$ mm
R3-2 et R12-2	0.4	1.5	I	(coupe à mi-longueur)
R4-2 et R13-2	1.0	1.5	I2	$x_2 = 0.8$ mm (2/3 B) ; $y = 0.6$ mm
R5-2 et R14-2	0.8	1.5	I	(coupe à mi-longueur)
R6-2 et R15-2	1.5	1.5	L	$x_2 = 1.0$ mm (2/3 B) ; $y = 0.2$ mm
R7-2 et R16-2	0.8	1.5	P	(4 coupes parallèles)
R8-2 et R17-2	0.6	1.5	I	(coupe à mi-longueur)
R9-2 et R18-2	2.5	1.5	L	$x_2 = 1.0$ mm (2/3 B) ; $y = 0.3$ mm

Tableau 2-III. Type et paramètres de coupe pour chacune des 36 résistances que compte une des 4 zones d'un *test pattern*.

Les résistances Rx–1 ont une largeur de 0.6 mm et les Rx-2 une largeur de 1.5 mm.

Les résistances R1–x à R9–x ont les terminaisons a et les R10–x à R18–x ont les terminaisons b.

Sur chaque *test pattern*, il existe 4 zones équivalentes, dénommées A, B, C et D. Elles ont servi ici à étudier l'effet de la puissance du laser, exprimée en pourcentage de la puissance maximale (paramètre machine). Les mêmes puissances ont été appliquées à tous les échantillons, à savoir 40%, 35%, 45% et 50% pour les zones A, B, C et D respectivement.

3. Résultats

3.1. Puissance nécessaire pour couper les résistances (coupe "X")

Les résultats des coupes "X" sont donnés (2 points par résistance et puissance) aux figures 3–1 (DP 2021, 2031 et 2051) et 3–2 (ESL 2612). A l'état coupé, la résistance n'est "infinie" ($> 1\text{G}\Omega$) dans aucun cas, mais les valeurs pour DP 2031 et DP 2051 sont de l'ordre de $100\text{M}\Omega - 1\text{G}\Omega$, ce qui apparaît suffisant pour un ajustement (min. 1000x la résistance carrée nominale). Les valeurs pour DP 2021 et ESL 2612 sont plus faibles, surtout ESL 2612. Dans tous les cas, la résistance après coupe pour 35% est plus faible que pour les autres puissances.

Au verrage, toutes les résistances cessent d'être mesurables ($> 1 \text{ G}\Omega$), sauf DP 2021, DP 2051 (1 point sur 2) et ESL 2612 coupées à 35%, et ESL 2612 coupé à 40%. Pour DP 2021 et DP 2051, ces résistances seraient théoriquement suffisantes pour un ajustement. En revanche, la résistance de ESL 2612 coupé à 35% est nettement trop basse. Il est donc recommandé de couper DP 2021, DP 2031 et DP 2051 à min. 40%, et ESL 2612 à min. 45%.

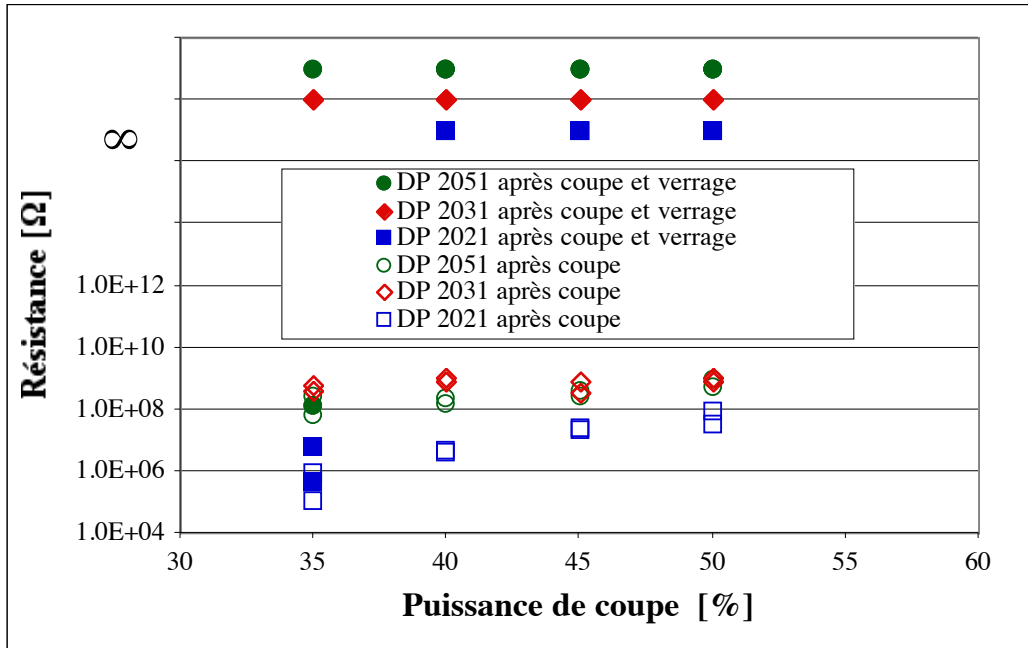


Figure 3-1. DP 2021, 2031 et 2051 : résistance après coupe totale ("X"), avant et après verrage.

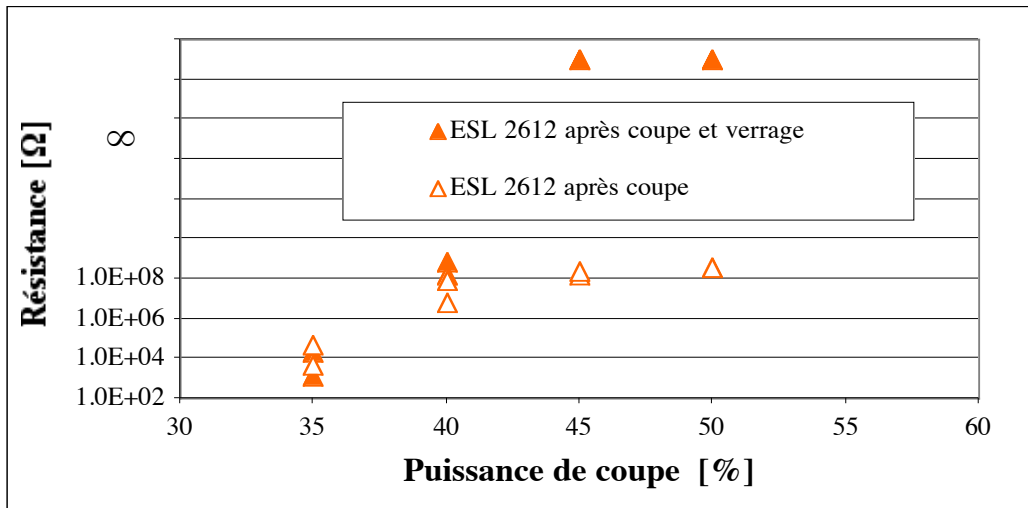


Figure 3-2. ESL 2612 : résistance après coupe totale ("X"), avant et après verrage.

3.2. Altération de la résistance au voisinage de la coupe (coupe "P")

Les résultats des coupes "P" sont donnés (2 points par résistance et puissance) aux figures 3–3 (DP 2021, DP 2031 et DP 2051) et 3–4 (ESL 2612).

DP 2051

On remarque immédiatement le comportement anormal de DP 2051 : la résistance, au lieu d'augmenter légèrement en raison de la largeur des coupes réalisées, diminue fortement, et cela d'autant plus que la puissance de coupe augmente. La situation s'inverse cependant au verrage, qui exacerbe ce phénomène pour les coupes effectuées à 35%, mais le compense partiellement pour les coupes à 50%. Cependant, la dispersion à puissance élevée semble très importante.

Il semble donc difficile d'ajuster ce genre de résistances, car la matière est modifiée au bord de la coupe de sorte à devenir beaucoup plus conductrice que l'ensemble. Ce genre de situation est défavorable, car le courant est concentré sur cette zone peu reproductible et instable, car fortement dépendante des conditions de coupe et microfissurée. Les propriétés de la résistance ajustée ne manqueront donc pas de s'en ressentir.

DP 2021 et DP 2031 (et DP 2041)

Comme prévu, ces résistances augmentent légèrement lors de la coupe. On peut convertir ces augmentations en largeurs coupées, en postulant qu'une coupe parallèle enlève un peu de largeur à la résistance. On obtient des largeurs effectives de coupe raisonnables, entre 30 et 50 μm par trait, du même ordre de grandeur que la largeur de matière physiquement enlevée.

Si on y regarde de plus près, seul le comportement de DP 2021 est vraiment normal : l'augmentation de la valeur de la résistance croît avec la puissance de coupe, en accord avec le fait qu'une puissance plus élevée donne un trait légèrement plus large. Avec DP 2031, en revanche, l'augmentation de la valeur décroît avec la puissance de coupe, ce qui laisse penser que des phénomènes similaires à ceux présents dans DP 2051 sont déjà à l'oeuvre. Il est donc prévisible que DP 2041, non étudié ici de cette manière, montrera une assez forte altération de matière au voisinage de la coupe. En fait, des résultats préliminaires pas tout à fait comparables, car sur acier et diélectrique, montrent une diminution de la valeur de l'ordre de 2% (puissance = 35%) à 10% (puissance = 50%) pour la même coupe "P" sur DP 2041.

Au verrage, DP 2021 et DP 2031 évoluent de manière assez monotone et reproductible. En l'absence d'échantillons de référence identiques (avec aussi les mêmes terminaisons), mais non coupés, il est impossible de tirer des conclusions définitives concernant le comportement au verrage de la coupe. Cependant, le fait que la puissance de coupe influe peu sur l'évolution au verrage de ces résistances indique que cette évolution est essentiellement semblable à celle d'une résistance non coupée.

Pour DP 2021 et DP 2031, il n'y a comme prévu pas de différence systématique entre les deux terminaisons utilisées, celles-ci (Ag et Ag:Pd 25:1) étant de composition quasi identique.

ESL 2612

Le comportement à la coupe de ESL 2612 est similaire à DP 2021 ; on obtient aussi une augmentation de la valeur, augmentation qui croît légèrement avec la puissance de coupe. Les largeurs effectives de coupe vont de 45 à 60 μm . Le comportement au verrage est ici aussi assez indépendant de la puissance de coupe. En revanche, on observe un fort effet de terminaison : la valeur augmente plus fortement avec Ag:Pd 3:1 qu'avec Au.

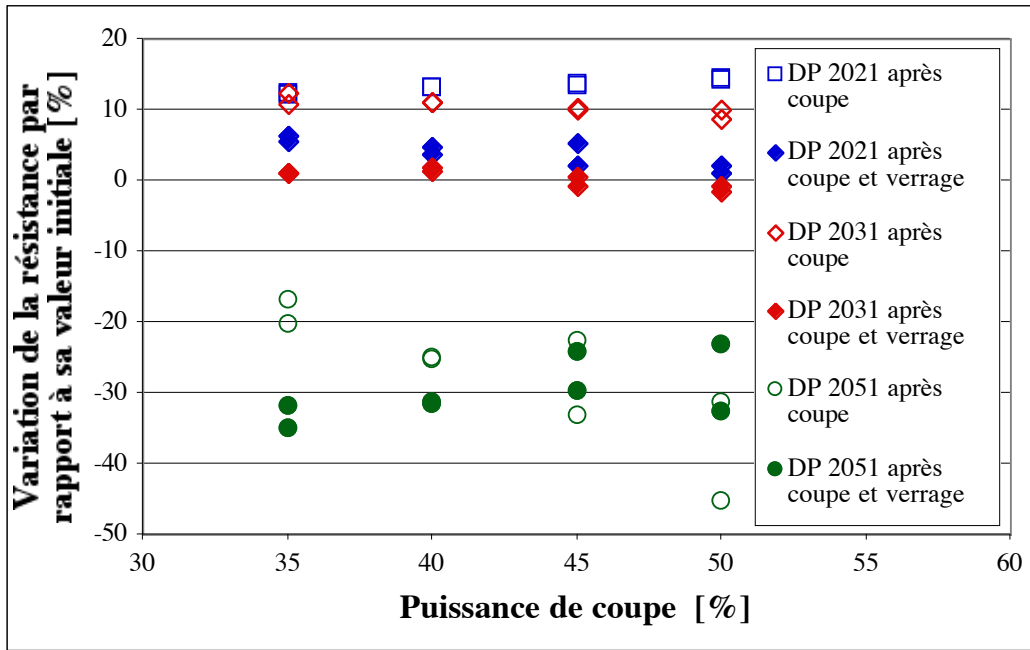


Figure 3-3. DP 2021, 2031 et 2051 : variation de la résistance par rapport à la valeur initiale, après coupe parallèle ("P"), avant et après verrage.

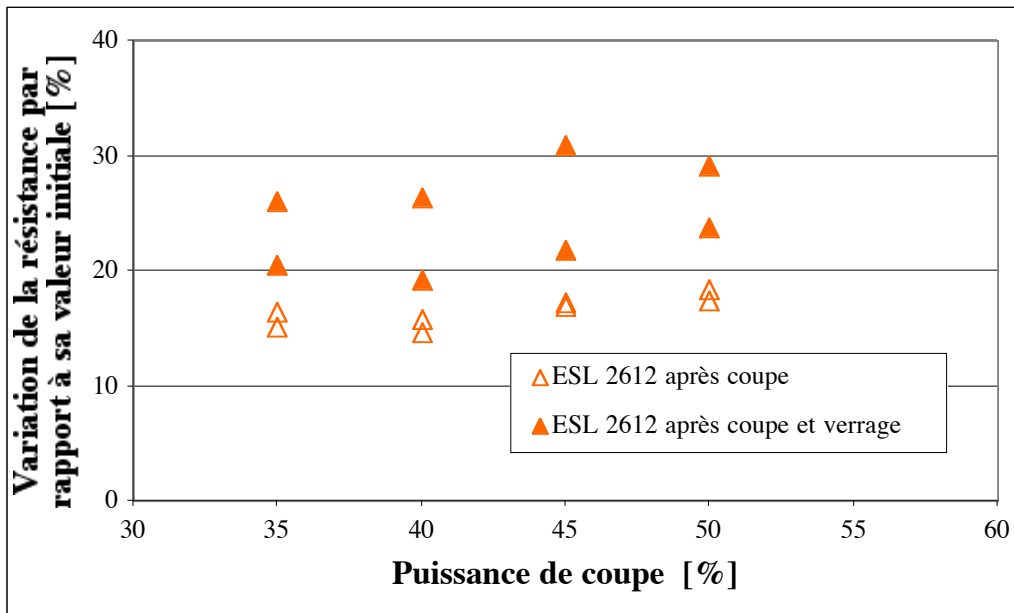


Figure 3-4. ESL 2612 : variation de la résistance par rapport à la valeur initiale, après coupe parallèle ("P"), avant et après verrage. La différence de comportement au verrage est due aux terminaisons : la valeur augmente plus pour Ag:Pd 3:1 que pour Au.

3.3. Effet du verrage sur les résistances ajustées à 2x leur valeur initiale

Les résultats pour les ajustements "classiques", à 2x la valeur initiale de chaque résistance, sont donnés aux figures 3-5 à 3-8.

DP 2021

Cette composition résistive se comporte manifestement bien au verrage à l'état ajusté. La dispersion sur les résultats est très faible, et le comportement à l'ajustement est quasi indépendant de la puissance de coupe. Le fait que la coupe ne soit pas totalement ouverte à 35% (fig. 3-1) ne semble donc pas gênant : la conductance des coupes, bien que non nulle, reste négligeable par rapport à celle des zones non coupées (facteur > 1000). Néanmoins, vu que le travail à puissance élevée ne semble apporter aucun effet négatif, il est recommandé d'ajuster cette composition à min. 40%.

DP 2021 semble présenter un effet de terminaison au verrage assez fort avec les terminaisons riches en argent utilisées ici, la variation au verrage passant de +5% pour une longueur de 0.3 mm à -5% pour 5 mm.

DP 2031

Cette composition se comporte aussi très bien au verrage à l'état ajusté, montrant aussi une faible dispersion des résultats et une faible dépendance de la puissance de coupe. Comme dans le cas de DP 2021, une puissance de coupe de 40% semble recommandable.

Par rapport à DP 2021, DP 2031 possède en outre l'avantage de présenter un faible effet de terminaison au verrage, du moins sur sa valeur.

Cette résistance se prête donc fort bien à l'ajustement grossier d'un pont de mesure. Son utilisation pour cette application semble notamment préférable à celle de DP 2041. En effet, cette dernière semble avoir un comportement au verrage nettement moins sain après ajustement¹, bien que ces résultats doivent encore être précisés.

DP 2051

Comme le laissaient entrevoir les résultats de la section 3.2, cette composition se comporte moins bien au verrage à l'état ajusté que DP 2021 ou DP 2031.

- La dispersion des résultats est nettement plus grande.
- La variation au verrage dépend de la puissance laser, ce qui est une confirmation du fait que les bords de la coupe sont fortement altérés. Une autre confirmation est donnée par le fait que, en règle générale, les résistances montrant le comportement le plus erratique au verrage sont les résistances minces et longues ajustées en L.

La puissance recommandée pour ajuster ces résistances est de 40%, avec peu de marge de manoeuvre vers le haut (endommagement) ou vers le bas (découpe insuffisante). De plus, d'après ces résultats, il semble paradoxalement plus favorable d'ajuster cette composition en I qu'en L ; la pointe de la coupe semble moins altérée que le bord.

ESL 2612

Cette composition a un comportement au verrage à l'état ajusté que l'on peut qualifier de moyen. En effet, les variations au verrage montrent une certaine dispersion, surtout à haute puissance de coupe. En revanche, cette dispersion ne devient jamais catastrophique (< 10%), quelle que soit la puissance ou la géométrie. Comme on l'a vu à la section 3.2, les valeurs de ESL 2612 montrent un fort effet de terminaison pour Ag:Pd 3:1.

Sur la base des résultats, la puissance recommandée est de 40%, comme pour les autres compositions.

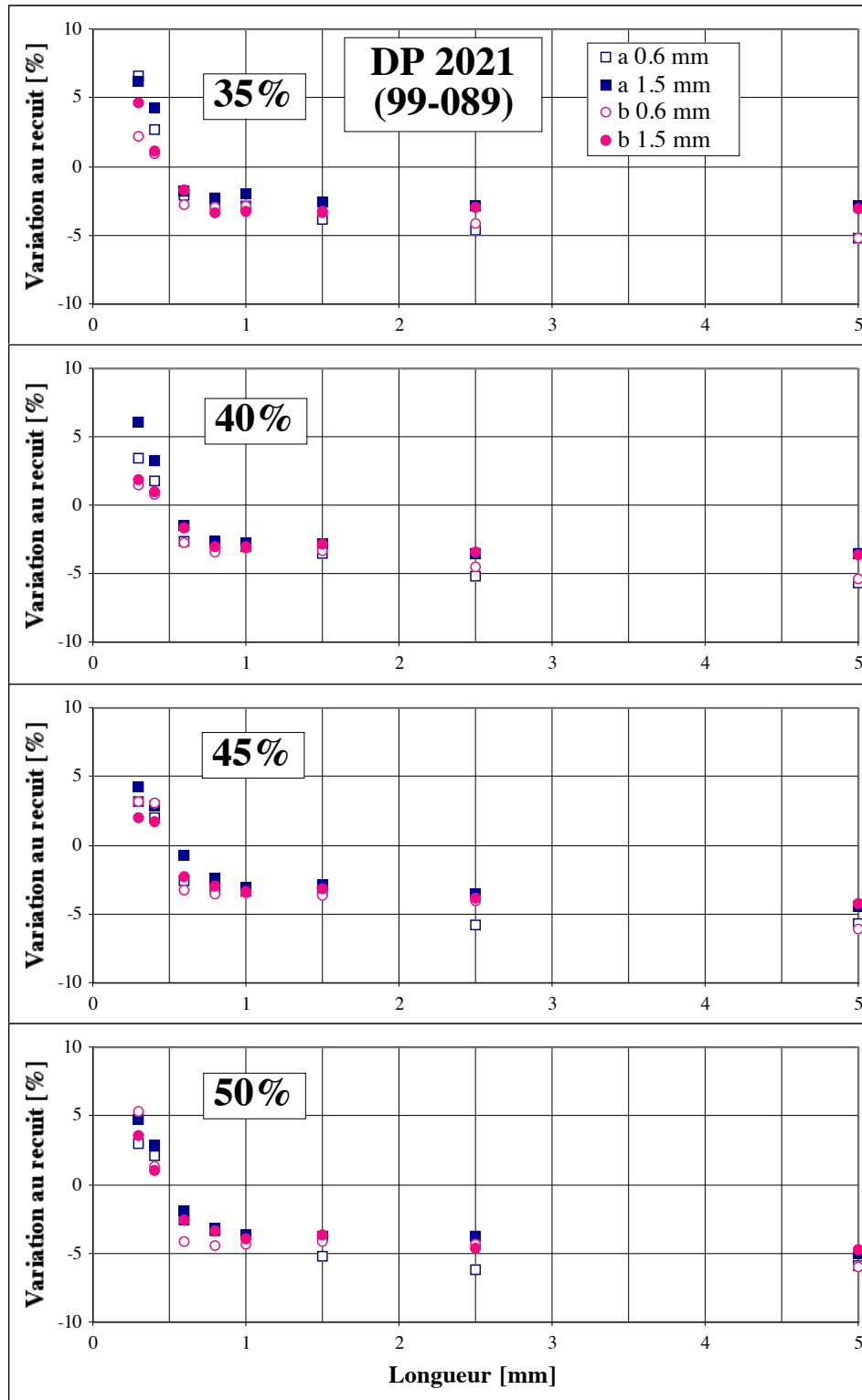


Figure 3-5. Variation des résistances ajustées lors de la cuisson du verrage, en fonction de la puissance laser (35 à 50%), de la largeur, de la terminaison et du nombre de carrés avant ajustement.
 Résistances : DP 2021 (325 mesh / 40 μ m) ; a) ESL 9912 (Ag) ; b) ESL 9695 (Ag:Pd 25:1).

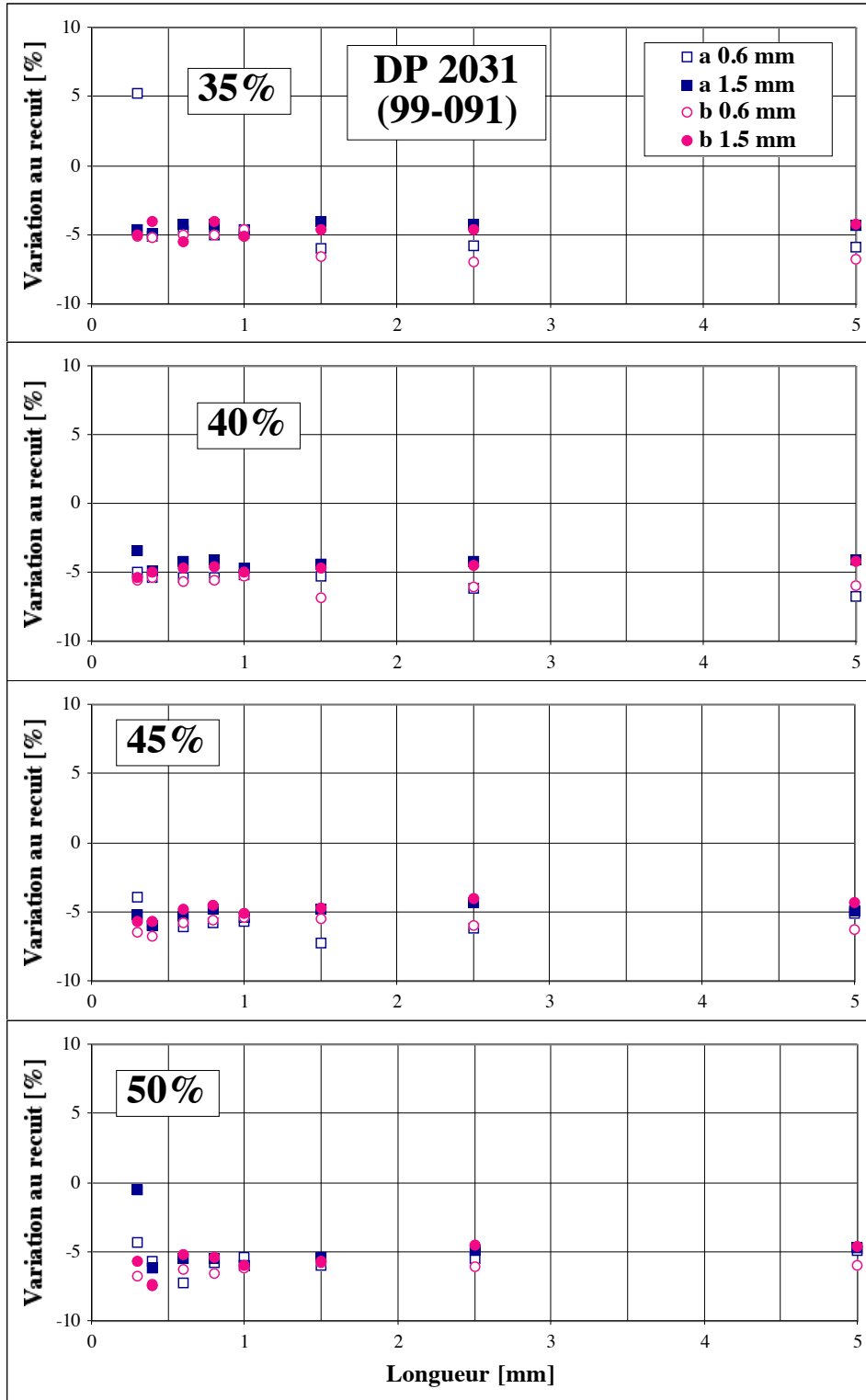


Figure 3-6. Variation des résistances ajustées lors de la cuisson du verrage, en fonction de la puissance laser (35 à 50%), de la largeur, de la terminaison et du nombre de carrés avant ajustement. Résistances : DP 2031 (325 mesh / 40 μ m) ; a) ESL 9912 (Ag) ; b) ESL 9695 (Ag:Pd 25:1).

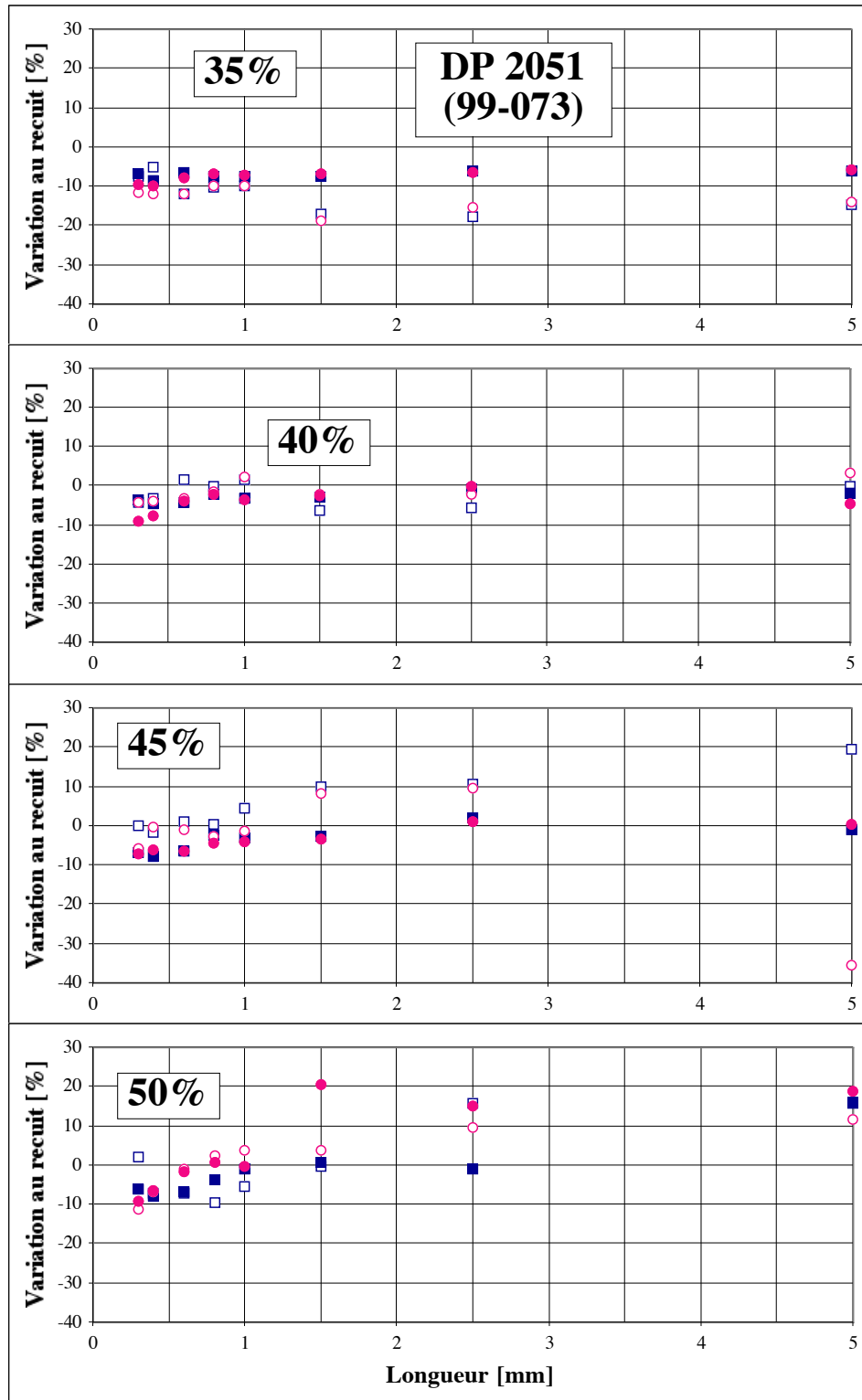


Figure 3-7. Variation des résistances ajustées lors de la cuisson du verrage, en fonction de la puissance laser (35 à 50%), de la largeur, de la terminaison et du nombre de carrés avant ajustement.
 Résistances : DP 2051 (325 mesh / 40 μm) ; a) ESL 9912 (Ag) ; b) ESL 9695 (Ag:Pd 25:1).

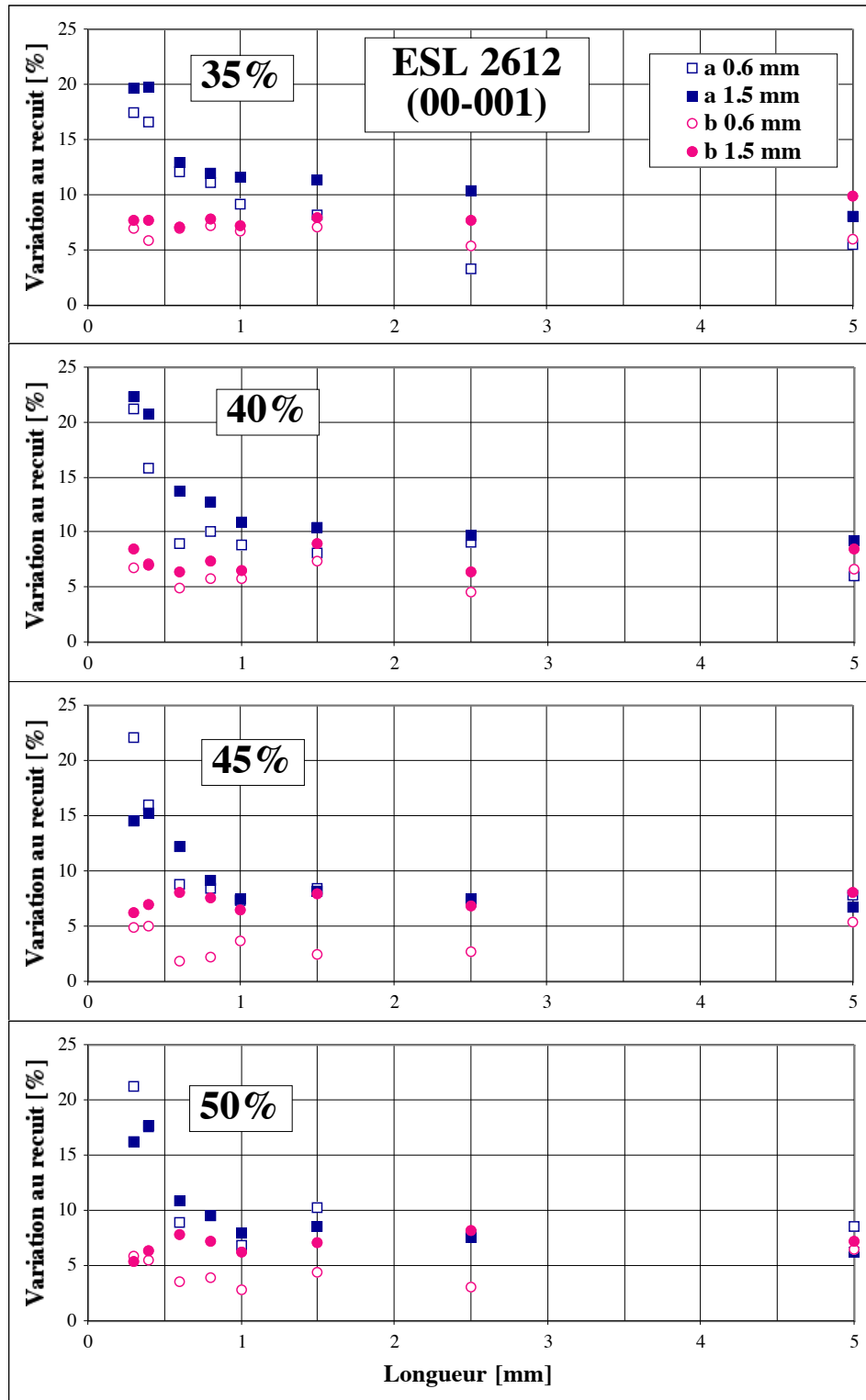


Figure 3-8. Variation des résistances ajustées lors de la cuisson du verrage, en fonction de la puissance laser (35 à 50%), de la largeur, de la terminaison et du nombre de carrés avant ajustement.
 Résistances : ESL 2612 (325 mesh / 40 μm) ; a) DP 5104 (Ag:Pd 3:1) ; b) DP 5744 (Au).

4. Conclusions

Cette étude visait à établir grossièrement les conditions pour réaliser des ajustements relativement stables au verrage sur DP 2021, DP 2031, DP 2051 et ESL 2612, en tant que base pour des études ultérieures plus systématiques et complètes.

DP 2021 et DP 2031 montrent de loin le meilleur comportement au verrage à l'état ajusté, c'est-à-dire une faible dispersion et une faible dépendance de la puissance de coupe. Ces résultats sont confirmés par des études de l'endommagement des bords de la coupe. ESL 2612 a aussi un comportement relativement bon, bien que présentant une plus grande dispersion des résultats.

DP 2051 pose manifestement problème à l'ajustement, car il se forme au bord de la coupe une zone qui est nettement plus conductrice que la résistance à l'état cuit. La concentration résultante de courant dans cette zone endommagée et peu reproductible entraîne une forte dispersion des valeurs au verrage, et laisse mal augurer des autres propriétés (coefficient en température et stabilité). Des résultats préliminaires sur acier indiquent que DP 2041 a un comportement analogue, quoique nettement moins extrême.

Pour toutes ces résistances, la puissance d'ajustement recommandée avec le laser LS 9000 de l'IPM est de 40%. Il faut noter que cette puissance peut changer si la résistance est déjà recouverte de verrage, ou si elle est sérigraphiée avec une autre épaisseur.

Perspectives

Comme mentionné dans l'étude précédente¹, ces résultats serviront de base à des études plus complètes et systématiques. En plus des thèmes déjà mentionnés, l'étude en détail de la coupe semble être de première importance. Il s'agit notamment de comprendre pourquoi la résistivité peut fortement diminuer au voisinage de la coupe.