

## Résistance au cisaillement d'assemblages de poutres MilliNewton sur leur embase réalisés par brasure tendre

*Essais de cisaillement (shear tests) sur des poutres MilliNewton assemblées par brasure tendre eutectique Sn–Ag (alliage Sn96, 96.5% Sn + 3.5% Ag, température de fusion 221°C), sur alumine, zircone et métaux recouverts de conducteur ESL 9635B (Ag:Pd 3:1).*

*Scherprüfungen an MilliNewton – Biegebalken, gelötet mit Sn–Ag Eutektikum (Sn96 Legierung, 96.5% Sn + 3.5% Ag, Schmelzpunkt 221°C), auf Aluminiumoxyd, Zirkonoxyd und Metallen bedeckt mit ESL 9635B (Ag:Pd 3:1) Leiter.*

Thomas Maeder et Giancarlo Corradini, 12.12.2000

**Projet:** brasure métallique, TEPLAZID.

**Mots-clefs:** brasure, résistance mécanique, essai de cisaillement, *shear test*, alumine, zircone, métal, acier, titane, diélectrique.

<b>1. Introduction .....</b>	<b>2</b>
<b>2. Expériences.....</b>	<b>3</b>
<b>3. Résultats .....</b>	<b>7</b>
<b>4. Conclusions.....</b>	<b>17</b>

### Résumé

Des essais de cisaillement (*shear tests*) ont été effectués sur des poutres assemblées sur leur embase par brasure tendre eutectique Sn–Ag. Ces tests ont été effectués sur des embases et poutres en  $Al_2O_3$  et en  $ZrO_2$ , ainsi que sur des combinaisons métal (acier et titane)– diélectrique, métallisées avec du conducteur ESL 9635B (Ag:Pd 3:1).

L'étamage préalable de l'embase par une fine couche de brasure (env. 0.1 mm) diminue considérablement la porosité de la brasure, et permet d'obtenir des joints fiables et à résistance élevée. Dans ces conditions, on obtient une rupture de la brasure à des contraintes nominales de l'ordre de 60 MPa. Une augmentation de l'épaisseur de la brasure tend à diminuer cette valeur, qui reste cependant acceptable.

Sur  $Al_2O_3$ , l'adhérence entre les couches est excellente. En revanche, sur  $ZrO_2$ , acier et titane, l'adhérence peut devenir le facteur limitant la solidité de l'assemblage, et devra donc être étudiée avec soin.

- Sur  $ZrO_2$ , l'adhérence de ESL 9635B est manifestement moins bonne que sur  $Al_2O_3$ .
- Sur acier, l'adhérence du diélectrique semble être le facteur limitant si le diélectrique est raisonnablement solide.
- Sur titane, l'utilisation comme couche de fond de Heraeus IP065 confère une excellente adhérence aux diélectriques. En revanche, si le diélectrique superposé est trop mince, Heraeus IP065 peut partiellement remonter et pénétrer dans le conducteur, ce qui entrave sa mouillabilité par la brasure.

## Kurzfassung

Scherversuche wurden an Biegebalken durchgeführt, die mit Sn–Ag Eutektiklot auf ihre Unterlagen gelötet waren. Diese Tests wurden hier auf Unterlagen und Biegebalken aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$  und mit Dielektrikum bedeckten Metallsubstraten (Stahl und Titan) durchgeführt. In allen Fällen wurde als Metallisierung ESL 9635B Leiterpaste (Ag:Pd 3:1) eingesetzt.

Durch "verzinnen" der Unterlage (der Lot wird vor der Montage des Biegebalkens einmal geschmolzen) wird eine starke Herabsetzung der Porosität im Lot erreicht, was feste Lotstellen erlaubt. Die nominale Bruchspannung beträgt in diesem Fall ca. 60 MPa für dünne Lotschichten (ca. 0.1 mm). Der Einsatz dickerer Schichten bewirkt eine leichte Herabsetzung der Festigkeit, die aber genügend hoch bleibt.

Auf  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ist die Haftung der Schichten ausgezeichnet. Auf  $\text{ZrO}_2$ , Stahl und Titan kann die Haftung der Schichten der limitierende Faktor für die Festigkeit der Verbindung werden. Diese Thema wird man deshalb sorgfältig untersuchen müssen.

- Auf  $\text{ZrO}_2$  ist die Haftung der ESL 9635B Leiterpaste offensichtlich weniger gut als auf  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .
- Mit Stahl ist meistens – falls das Dielektrikum fest genug ist – die Haftung des Dielektrikums auf dem Stahl der Schwachpunkt.
- Auf Titan erreicht man sehr gute Haftung der Dielektrika, indem man Heraeus IP065 (das "hermetische Glas") als Grundschicht einsetzt. Dadurch besteht aber die Gefahr, dass das Glas durch das Dielektrikum in den Leiter diffundiert, was die Lötbarkeit beeinträchtigt. Dies kann geschehen, wenn das Dielektrikum zu dünn ist.

## 1. Introduction

Le capteur de force Sensile MilliNewton est basé sur une poutre en flexion munie de piézorésistances en technologie des couches épaisses. La poutre est montée sur son embase (fig. 1–1, ici avec embase sans amplification) par brasage tendre à la manière d'un composant électronique, ce qui présente l'avantage de combiner la liaison mécanique et la liaison électrique dans un seule et même opération.

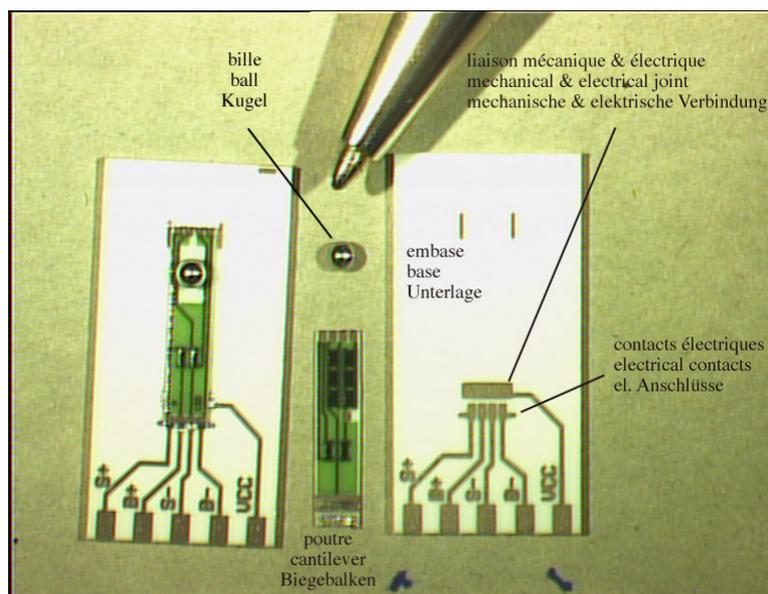


Fig. 1–1. Poutre MilliNewton sur embase sans amplification.

Le but de cette étude est de tester la résistance de l'assemblage par brasure eutectique Sn–Ag de la poutre sur son embase, sur alumine, zircone, acier et titane.

- Sur alumine, on se propose d'étudier la dépendance de la résistance de la brasure en fonction des conditions de brasage.
- Sur les autres substrats (zircone, acier inox ferritique 1.4016 = X5Cr17 et titane non allié), on comparera, pour des conditions de brasage donnant une bonne qualité de joint (brasure dense), la résistance de l'assemblage avec celle obtenue dans de mêmes conditions sur alumine. Notamment, on cherchera à déterminer si l'adhérence des couches épaisses (conducteur, diélectriques) sur le substrat constitue le facteur limitant.

## 2. Expériences

### *Poutres et embases*

Des schémas de la poutre et de son montage sur l'embase sont donnés aux figures 2–1 et 2–2. La plage de brasure principale, seule à être utilisée dans ces tests, a ici une dimension de 2 mm x 3 mm = 6 mm<sup>2</sup>, c'est-à-dire celle utilisée pour le montage sur le circuit amplifié. Les matériaux utilisés pour les poutres et embases sont donnés au tableau 2–I. Le matériau de référence est bien entendu l'alumine 96%.

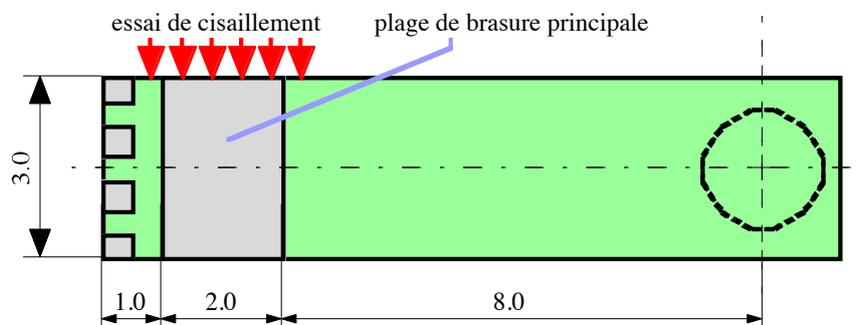


Figure 2–1. Poutre, vue de dessous, avec direction de sollicitation pour les essais de cisaillement.

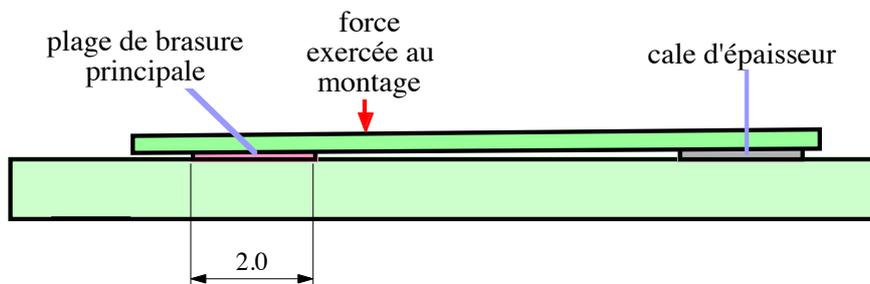


Figure 2–2. Montage de la poutre sur l'embase, vue de profil. Dans cette étude, on ne brase que la plage principale.

<b>Embases</b>	- Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 96% (épaisseur 1 mm, Kyocera A-476, référence) - ZrO <sub>2</sub> (tétraгонаle, + 3% Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , épaisseur 0.8 mm, Coors) - acier inox ferritique 1.4016 = X5Cr17 - titane non allié T40 (1 mm)
<b>Poutres</b>	- Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 96% (épaisseur 0.25 mm, Kyocera A-476, référence) - ZrO <sub>2</sub> (tétraгонаle, + 3% Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , épaisseur env. 0.25 mm, Coors)

Tableau 2-I. Matériaux utilisés pour les poutres et les embases.

### Diélectriques et conducteurs

L'empilement des couches est schématisé à fig. 2-3 et les différentes variantes de poutres et d'embases étudiées ici sont répertoriées au tableau 2-I.

Les poutres MilliNewton (1<sup>ère</sup> version), en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 96% ou ZrO<sub>2</sub>, sont métallisées avec **deux couches** de conducteur ESL 9635B (Ag:Pd 3:1), cuites séparément. Les couches de conducteur ont été ségraphiées directement sur les poutres, sans intercaler de diélectrique, avec une trame 325 *mesh* et une émulsion de 30  $\mu$ m.

Les embases métalliques (titane non allié ou acier inox ferritique à 17% Cr) sont recouvertes (325 *mesh* / 40  $\mu$ m) de deux couches de diélectrique (identiques ou différentes), cuites séparément. Toutes les embases sont métallisées par une **seule couche** de conducteur ESL 9635B.

Le profil "30MN\_PR" a été utilisé pour la cuisson du conducteur ESL 9635B et de la plupart des diélectriques. Ce profil présente un plateau d'env. 10 min à 850°C, et des vitesses maximales de chauffage / de refroidissement de 100 K/min. Pour le diélectrique (en fait, verre) Her IP065 uniquement, le profil de cuisson a été décalé vers le bas de 100°C, ce qui donne une température nominale de cuisson de 750°C. Ces deux profils sont donnés au tableau 2-II.

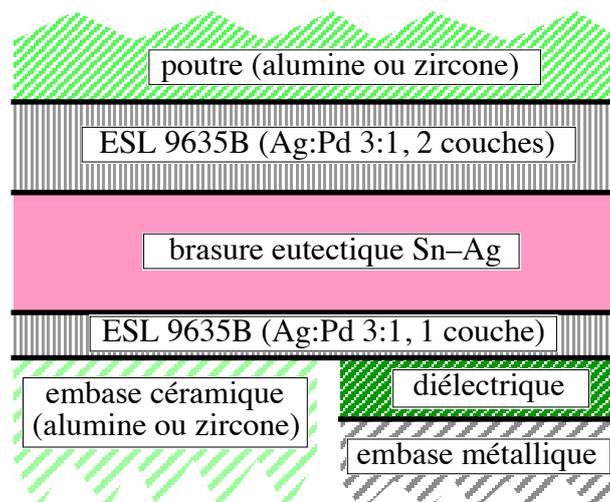


Figure 2-3. Empilement des couches intervenant dans l'assemblage de la poutre sur l'embase.

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
750°C	750	8.67	540	665	766	767	776	790

Tableau 2–II. Réglages du four Sierratherm pour le profil standard « 30MN\_PR » et pour la version "750°C", décalée de 100°C vers le bas.

### Brasure

Dans cette étude, seule la plage principale (figures 2–1 et 2–2) a été recouverte de brasure. La procédure de brasage "standard" utilisée dans cette étude pour comparer les différents substrats et diélectriques est décrite ci-dessous.

- 1) On applique à la seringue une couche "fine" (donnant une épaisseur d'env. 100  $\mu\text{m}$ ) de brasure eutectique en pâte Sn–Ag (alliage SN96, 96.5% Sn et 3.5% Ag, fusion à 221°C) sur la plage de brasure principale **de l'embase**.
- 2) On effectue la refusion de la brasure une première fois, **sans encore assembler la poutre** (étamage de la plage) aux alentours de 240°C sur plaque chauffante. Après cette étape, la brasure forme idéalement une couche dense, recouverte du décapant (colophane).
- 3) La poutre est posée sur l'embase ainsi étamée, et on fait une **seconde refusion** (plaque chauffante, 240°C) de la brasure tout en appuyant la poutre contre l'embase côté brasure et contre une cale d'épaisseur de 0.1 mm côté bille. On relâche ensuite la force **avant** de refroidir l'échantillon, ce qui permet à la brasure de trouver un équilibre donné par sa tension de surface.

Sur  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , on a étudié l'effet de quelques variations à cette procédure standard. Celles-ci sont répertoriées au tableau 2–III.

Désignation	Description
Brasure épaisse	Comme procédure standard, mais on dépose <b>plus de brasure</b> sur la plage (env. 0.2 mm).
2 couches	Une couche de brasure selon procédure standard (fine, plage étamée), puis nettoyage de la colophane et déposition d'une <b>seconde couche non étamée</b> avant assemblage de la poutre.
Embase et poutre	Comme procédure standard, mais <b>l'embase et la poutre</b> sont étamées avant assemblage.
Brasure nettoyée	Comme procédure standard, mais on <b>nettoie la colophane</b> (décapant) à la surface de la couche de brasure entre la 1 <sup>ère</sup> refusion et l'assemblage de la poutre.

Tableau 2–III. Les procédures de brasage alternatives étudiées sur alumine.

## Echantillons

Les combinaisons des variations des substrats (poutres et embases), des diélectriques et des procédures de brasage sont répertoriées au tableau 2–IV. Elles se subdivisent en 4 groupes d'échantillons.

- Aa01-Aa05.** Il s'agit des **échantillons de référence**, avec embase et poutre en alumine et procédure de brasage standard.
- Aa06-Aa17.** Ces échantillons représentent l'étude des **procédures de brasage alternatives**, toujours avec embase et poutres en alumine. En plus de la procédure elle-même, l'épaisseur de la cale utilisée lors de l'assemblage de la poutre (fig. 2–2) a aussi été variée.
- Zz01-Zz04.** Etude des substrats : **embase et poutre en zircone** (procédure de brasage standard).
- 00-9xx.** Etude des substrats : **embase métallique + diélectrique**, poutre en alumine (procédure de brasage standard).

No(s)	Embase	Diélectriques sur embase (et cuisson)	Poutre	Procédure de brasage	Cale [mm]
Aa01-Aa05	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	standard	0.10
Aa06-Aa07	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	brasure épaisse	0.10
Aa08-Aa10	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	brasure épaisse	0.25
Aa11-Aa14	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2 couches	0.25
Aa15	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	standard	0.25
Aa16	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	embase et poutre	0.25
Aa17	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	brasure nettoyée	0.10
Zz01-Zz04	ZrO <sub>2</sub>	-	ZrO <sub>2</sub>	standard	0.10
00-903	acier 1.4016	1) Her GPA 98–029 850°C 2) Her GPA 98–029 850°C	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	standard	0.10
00-906	acier 1.4016	1) ESL 4916 850°C 2) Her GPA 98–029 850°C	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	standard	0.10
00-910	acier 1.4016	1) ESL 4916 850°C 2) ESL 4702 850°C	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	standard	0.10
00-900	titane T40	1) Her IP065 750°C 2) Her GPA 98–029 850°C	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	standard	0.10
00-909	titane T40	1) Her IP065 750°C 2) ESL 4702 850°C	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	standard	0.10

Tableau 2–IV. Paramètres des différents échantillons.

## Essais de cisaillement

Les essais ont été réalisés avec un testeur Royce Instruments 552 muni d'une cellule de cisaillement de 50 kgf (env. 500 N), avec l'embout positionné à env. 0.2 mm de la surface du substrat. L'endroit sur le composant et la direction de sollicitation sont donnés à la fig. 2–1.

Après l'essai de cisaillement, on a qualifié la cause probable de la rupture par observation des faces de rupture.

### 3. Résultats

Les résultats de tous les tests sont donnés au tableau 3-I, et comparés aux figures 3-1 (procédure de brasage sur  $Al_2O_3$ ) et 3-2 (substrats et diélectriques).

#### 3.1. Procédure standard (embase étamée), sur $Al_2O_3$

L'étamage de l'embase par une couche fine de brasure (tests Aa01-Aa05) permet à la colophane (décapant intégré dans la brasure) de remonter à la surface, et diminue considérablement la porosité du joint : les faces de rupture sont relativement denses (fig. 3-3). On obtient ainsi d'excellentes contraintes nominales à la rupture (moyenne  $\pm$  écart-type :  $65 \pm 14$  MPa) si on compare à la résistance d'un barreau de brasure (env. 30-40 MPa). Dans un cas, on a même atteint la force maximale de la cellule de test (500 N). Même à ces charges élevées, c'est toujours la brasure qui cède ou la poutre qui se casse. L'adhérence sur  $Al_2O_3$  du conducteur ESL 9635B est donc excellente, même après brasure sur une couche de conducteur sans renfort (embases).

#### 3.2. Procédures de brasage alternatives, sur $Al_2O_3$

##### Brasure épaisse (tests Aa06-Aa10)

L'étamage de l'embase par une couche épaisse donne (indépendamment de l'épaisseur de cale utilisée) des résultats similaires à ci-dessus, mais la colophane semble avoir plus de difficultés à entièrement remonter à la surface : on obtient des faces de rupture légèrement plus poreuses (fig. 3-4). Les contraintes nominales à la rupture obtenues ( $45 \pm 10$  MPa) semblent légèrement plus faibles, mais restent tout à fait suffisantes.

##### Brasure en 2 couches (tests Aa11-Aa14)

La combinaison de deux couches, une étamée sur l'embase et une "fraîche", donne des joints nettement plus poreux (fig. 3-5), due à la difficulté qu'a la colophane de sortir de la brasure quand la poutre est déjà assemblée. Étonnamment, on n'observe pas de diminution notable de la contrainte à la rupture ( $62 \pm 5$  MPa). Cependant, on peut s'attendre que les caractéristiques de ce type de joint ne soient pas très reproductible, notamment au niveau des contraintes parasites générées sur la poutre.

##### Brasure standard (fine) avec cale de 0.25 mm (test Aa15)

Ce test illustre l'importance d'avoir assez de brasure pour remplir le volume entre la poutre et l'embase, qui est d'autant plus grand que la cale est épaisse. Dans ce test, le manque de brasure n'a pas permis de réaliser un joint sur toute la plage (fig. 3-6), d'où une chute des propriétés mécaniques.

##### Brasure standard sur embase et poutre (test Aa16)

L'étamage des deux surfaces est en principe un bon moyen de garantir un excellent mouillage, tout en permettant de nettoyer la colophane avant assemblage. Cet aspect est plutôt important pour le montage de capots hermétiques pour protéger des circuits à impédance très élevée : capteurs piézoélectriques et pyroélectriques.

On obtient ici un joint ayant une porosité assez fine (fig. 3-7). La contrainte à la rupture est largement acceptable (38 MPa), probablement réduite en raison de la grande épaisseur de brasure. On observe aussi cette réduction avec une couche épaisse de brasure.

### Brasure avec nettoyage de la colophane avant assemblage (test Aa17)

On obtient des résultats assez semblables à la procédure standard. Cependant, la face de rupture n'est pas très homogène (fig. 3–8), ce qui laisse à supposer que le mouillage n'est pas garanti de manière fiable avec cette procédure. Si on veut garantir un joint de haute qualité sans colophane, la procédure précédente (étamage des deux partenaires) est plus recommandée.

### **3.3. Effet du substrat / des diélectriques (procédure de brasage standard)**

#### Zircone

L'adhérence du conducteur ESL 9635B sur la zircone semble nettement moins bonne que sur l'alumine. Elle diminue légèrement la contrainte à la rupture par rapport à l'alumine ( $45 \pm 10$  contre  $65 \pm 14$  MPa), qui reste cependant tout à fait acceptable pour les joints pas trop sollicités.

La perte d'adhérence du conducteur sur la zircone n'est pas due ici à sa destruction par la brasure : suivant les échantillons, on observe ce décollement tant sur la poutre (fig. 3–9, 2 couches de ESL 9635B) que sur l'embase (fig. 3–10, 1 couche).

#### Acier 1.4016

Dans l'ensemble, l'adhérence des diélectriques sur l'acier est assez bonne, mais aucune solution ne donne qualitativement une aussi bonne adhérence que Her IP065 sur titane.

Sur la base du très petit nombre de tests effectués (un par variante), il est difficile de tirer des conclusions fiables. Néanmoins, ces résultats confirment quelques tendances observées dans des études antérieures.

- Le diélectrique Her GPA 98–029 est résistant mécaniquement, mais fortement sous contrainte sur l'acier, ce qui facilite la perte d'adhérence (fig. 3–11). Une gradation des contraintes en utilisant ESL 4916 comme 1<sup>ère</sup> couche donne apparemment de meilleurs résultats (fig. 3–12), ce qui est compatible avec des observations antérieures<sup>1</sup>.
- Le diélectrique ESL 4702 semble poreux (insuffisamment fritté ?) avec le profil de cuisson standard. C'est probablement la raison du décollement du conducteur ESL 9635B observé (fig. 3–13). Cette faiblesse a aussi déjà été observée précédemment<sup>2</sup>.

#### Titane

Toutes les études précédentes<sup>3,4</sup> ont montré que les verres de type Her IP065 font d'excellentes couches de fond sur titane, permettant une très bonne adhérence des couches supérieures. Malheureusement, ce verre présente le défaut de pénétrer dans les conducteurs, dont il affecte la brasabilité.

C'est ce qui s'est (légèrement) produit dans notre cas (figures 3–14 et 3–15), car l'épaisseur de Her GPA 98–029 ou ESL 4702 était insuffisante : la trame 325 *mesh* s'écrase trop sur les grandes plages, et on ne peut pas utiliser l'émulsion pour fixer l'épaisseur de sérigraphie. Dans l'avenir, il faudra donc déposer diélectrique sur Her IP065 avec une trame plus grossière.

Malgré ce léger problème de mouillage, les contraintes à la rupture obtenues (43 et 70 MPa) sont excellentes, ce qui laisse à penser que ce phénomène est tout à fait maîtrisable moyennant un diélectrique plus épais.

<sup>1</sup> Rapport " Dicke Schichten auf 1.4122 und 1.4462 – Stahlscheiben", T. Maeder, G. Corradini et S. Vionnet, 13.6.2000.

<sup>2</sup> Rapport "Résistance au cisaillement d'assemblages de composants réalisés par brasure tendre Sn-Ag, sur divers diélectriques et conducteurs", T. Maeder, 7.12.2000.

<sup>3</sup> Rapport "Couches épaisses sur titane et alliages", T. Maeder, 14.8.2000.

<sup>4</sup> Rapport " Résistances Du Pont 2041 sur titane et alliages", T. Maeder, 4.9.2000

Type	No	Contrainte nominale de rupture [MPa]	Mode de rupture	Figure
<b>référence</b> : embase et poutre Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , brasure standard	Aa01	<b>66</b>	brasure	3-3
	Aa02	<b>52</b>	brasure	
	Aa03	<b>≥ 82</b>	brasure	
	Aa04	<b>74</b>	brasure	
	Aa05	<b>48</b>	brasure et poutre	
<b>brasure</b> épaisse, cale 0.10 mm (embase et poutre Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Aa06	<b>28</b>	brasure	3-4
	Aa07	<b>61</b>	brasure	
<b>brasure</b> épaisse, cale 0.25 mm (embase et poutre Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Aa08	<b>46</b>	brasure	
	Aa09	<b>46</b>	brasure	
	Aa10	<b>59</b>	brasure	
<b>brasure</b> 2 couches, cale 0.25 m	Aa11	<b>60</b>	brasure et poutre	3-5
	Aa12	<b>66</b>	brasure	
	Aa13	<b>56</b>	brasure	
	Aa14	<b>66</b>	brasure	
<b>brasure</b> standard, cale 0.25 mm	Aa15	<b>16</b>	brasure	3-6
<b>brasure</b> sur embase et poutre	Aa16	<b>38</b>	brasure	3-7
<b>brasure</b> nettoyée	Aa17	<b>60</b>	brasure	3-8
<b>embase et poutre</b> ZrO <sub>2</sub> (brasure standard)	Zz01	<b>43</b>	interface conducteur-poutre et brasure	3-9
	Zz02	<b>35</b>	interface conducteur-poutre et brasure	
	Zz03	<b>44</b>	interface conducteur-embase et brasure	3-10
	Zz04	<b>60</b>	brasure	
<b>embase</b> acier 1/3 (poutre Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , brasure standard)	00-903	<b>43</b>	interface diélectrique-substrat	3-11
<b>embase</b> acier 2/3 (poutre Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , brasure standard)	00-906	<b>54</b>	brasure & poutre	3-12
<b>embase</b> acier 3/3 (poutre Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , brasure standard)	00-910	<b>26</b>	interface conducteur-diélectrique & brasure	3-13
<b>embase</b> titane 1/2 (poutre Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , brasure standard)	00-900	<b>43</b>	brasure, mouillage pas très bon	3-14
<b>embase</b> titane 2/2 (poutre Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , brasure standard)	00-909	<b>70</b>	brasure, mouillage pas très bon	3-15

Tableau 3-I. Résultats des essais de cisaillement (*shear tests*) : contraintes de rupture [MPa] nominales obtenues en divisant la force de rupture par la surface brasée nominale de 6 mm<sup>2</sup>.

**Vert** : rupture de la poutre ou de la brasure. **Rouge** : rupture ou décollement du diélectrique, décollement du conducteur ou mauvais mouillage de la brasure sur le conducteur.

**Beige** : cas intermédiaire.

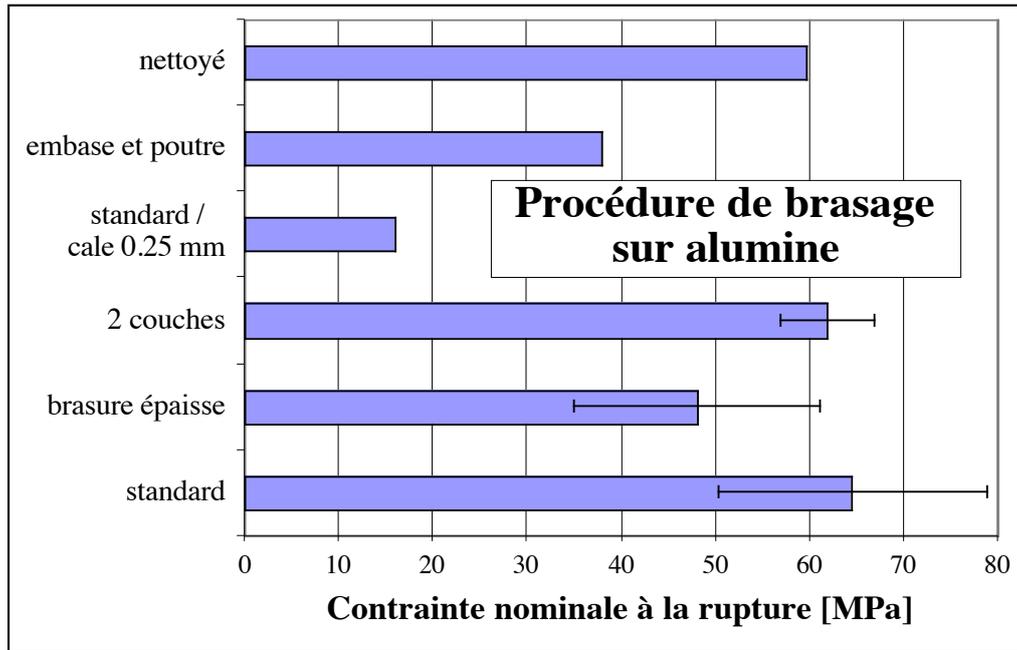


Figure 3–1. Comparaison des différentes procédures de brasage sur alumine. Là où on a fait plusieurs tests, on donne la moyenne  $\pm$  l'écart type.

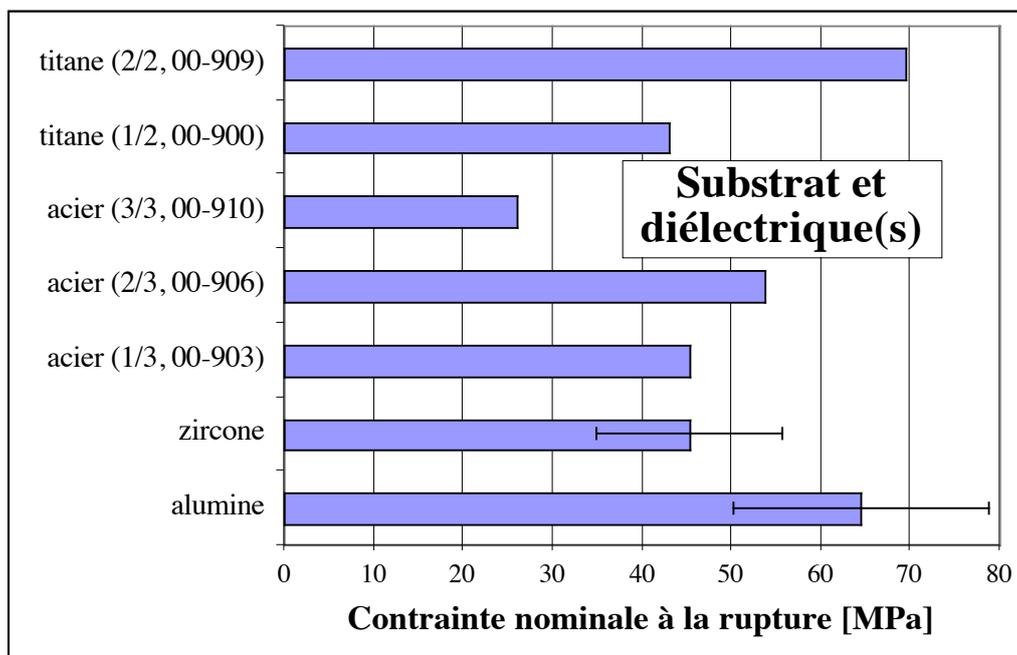


Figure 3–2. Comparaison des différents substrats et (acier et titane) diélectriques, avec la procédure de brasage standard. Là où on a fait plusieurs tests, on donne la moyenne  $\pm$  l'écart-type.

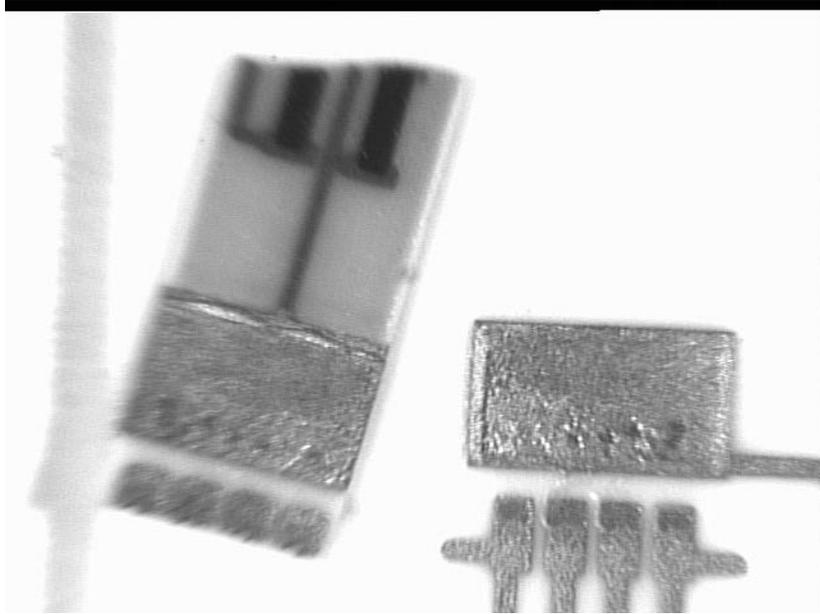


Figure 3-3. Faces de rupture (test Aa01) : embase étamée fin (standard), sur  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .  
La brasure cède. Le joint semble assez dense, ne révélant qu'une fine porosité.

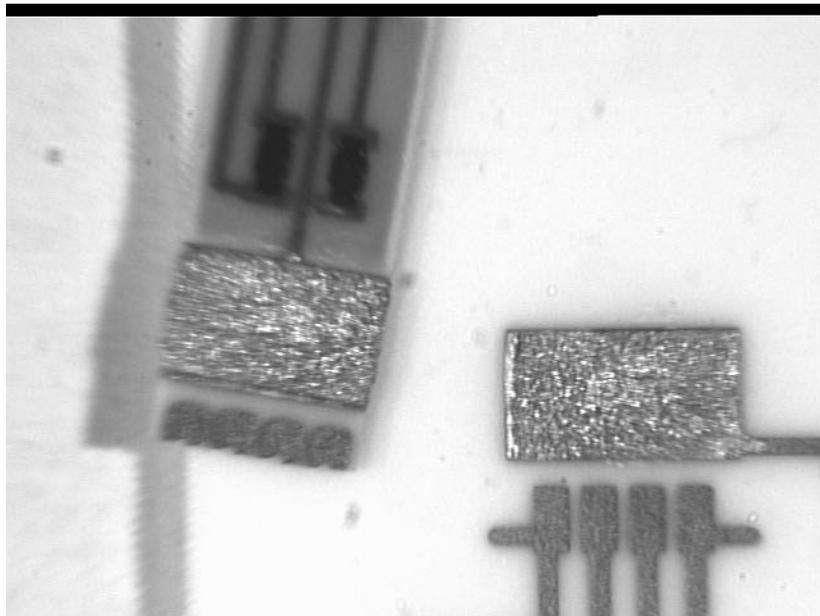


Figure 3-4. Faces de rupture (test Aa06) : embase étamée épais, sur  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .  
La brasure cède. Le joint est assez bon, mais semble être un peu plus poreux qu'une brasure fine.

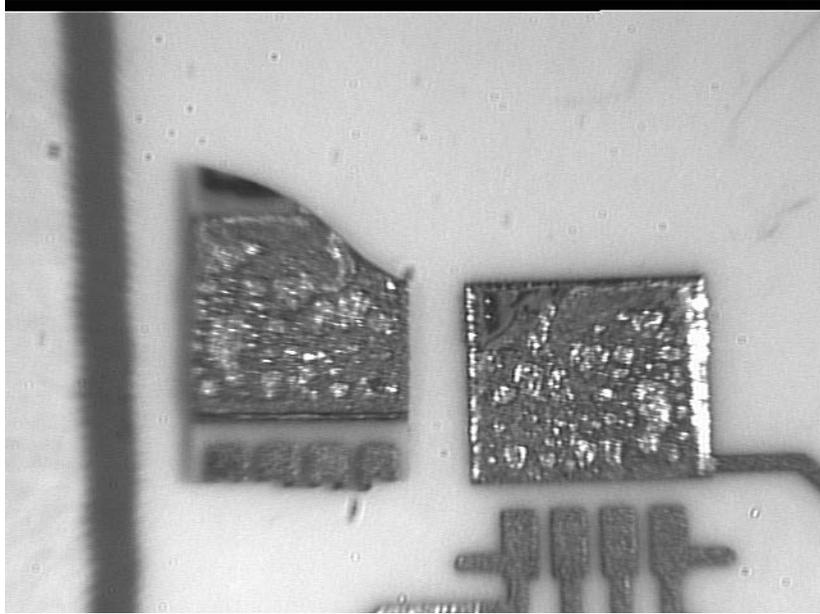


Figure 3–5. Faces de rupture (test Aa11) : 2 couches de brasure (1 étamée + 1 non étamée), sur  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . La brasure cède. Le joint est nettement plus poreux qu'une brasure étamée, fine ou épaisse.

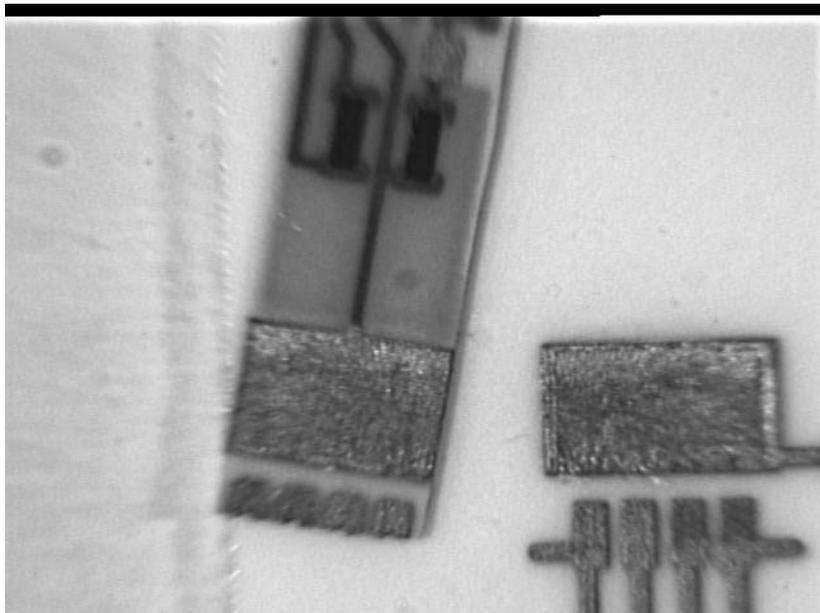


Figure 3–6. Faces de rupture (test Aa15) : embase étamée fin (standard), sur  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , mais avec cale de 0.25 mm. La brasure cède. En raison de la cale trop épaisse, une partie de la plage (zone claire en haut) n'a pas été brasée.

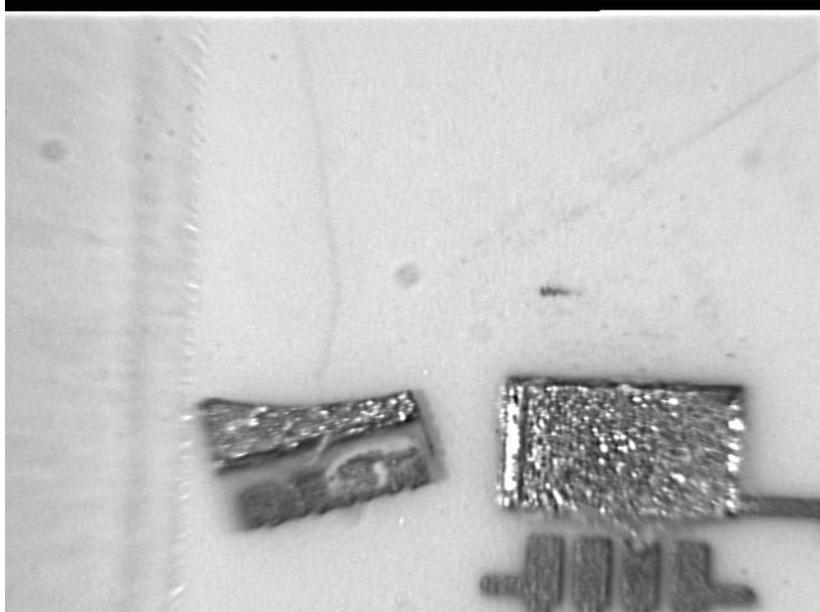


Figure 3-7. Faces de rupture (test Aa16) : embase et poutres étamées, sur  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . La brasure cède. Le joint est assez bon, mais semble être un peu plus poreux qu'une brasure fine.

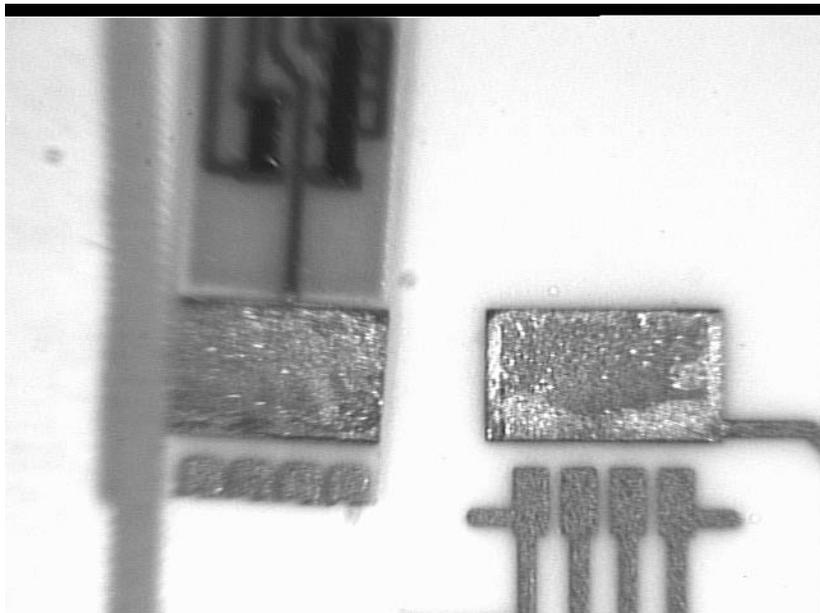


Figure 3-8. Faces de rupture (test Aa17) : embase étamée avec colophane nettoyée, sur  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . La brasure cède. Le joint est assez bon au centre, mais la brasure ne semble pas très homogène entre le centre et le bord ; il y a peut-être eu un problème de mouillage.

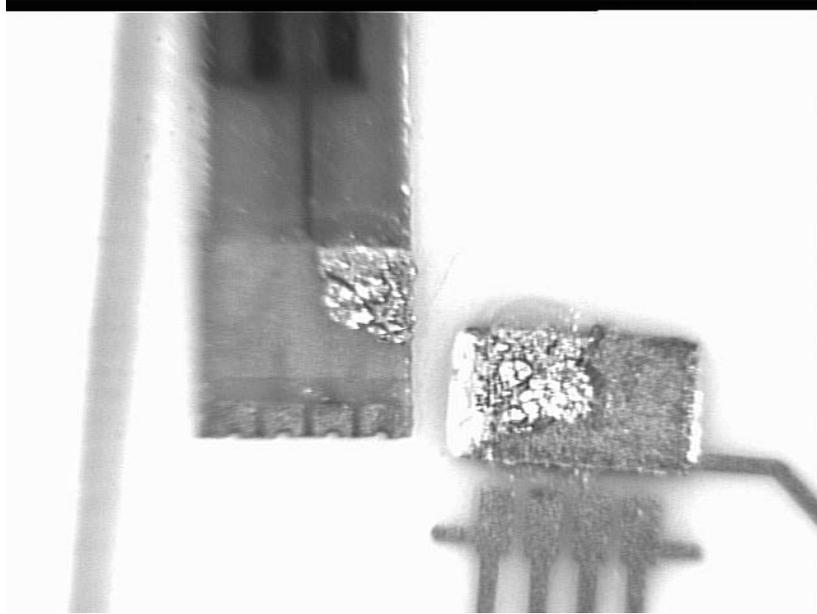


Figure 3–9. Faces de rupture (test Zz01) : procédure de brasure standard, sur  $ZrO_2$  (embase et poutre). Dans ce cas, c'est surtout l'interface entre la poutre et le conducteur qui cède. La brasure cède aussi sur une partie de la surface.

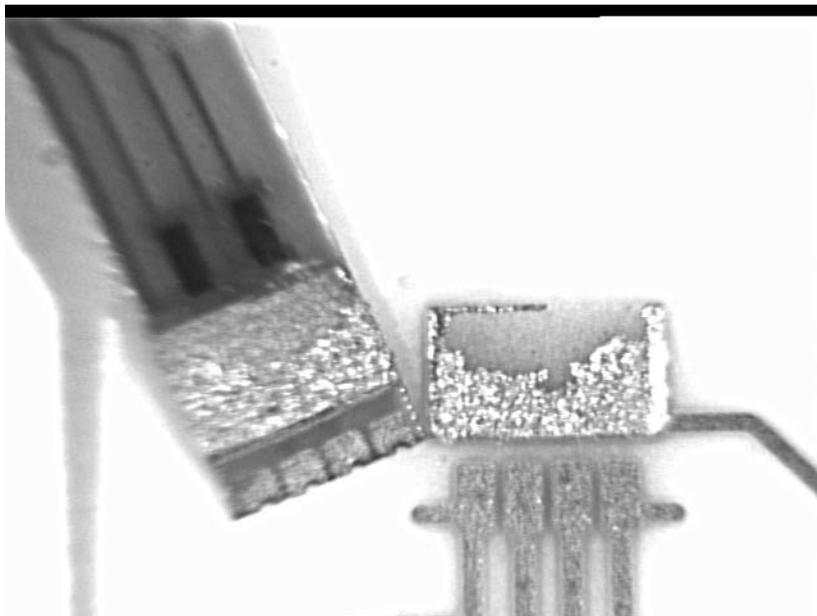


Figure 3–10. Faces de rupture (test Zz03) : procédure de brasure standard, sur  $ZrO_2$  (embase et poutre). Autre cas possible : c'est l'interface conducteur – embase qui cède partiellement.

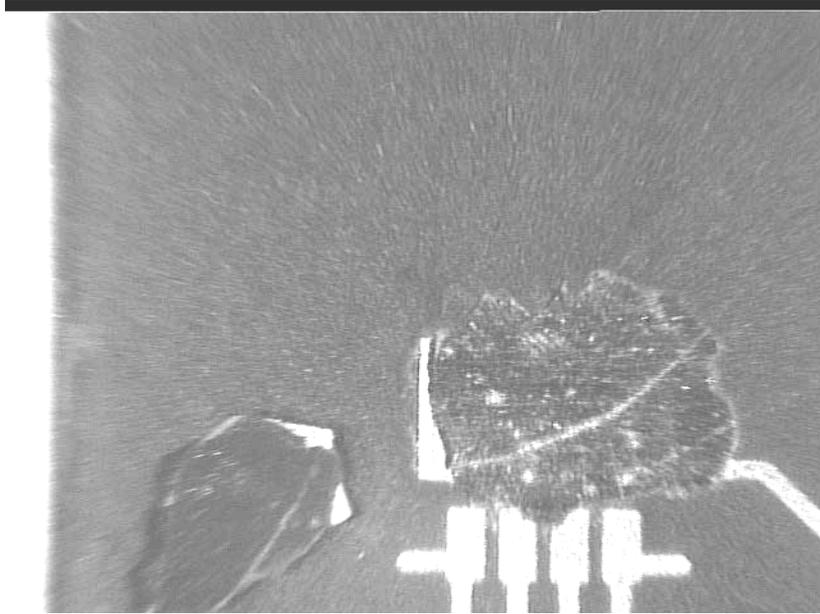


Figure 3-11. Faces de rupture (test 00-903) : procédure de brasure standard, sur acier – diélectrique 2 x Her GPA 98-029. Poutre  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .  
Le diélectrique se décolle de la surface de l'acier.

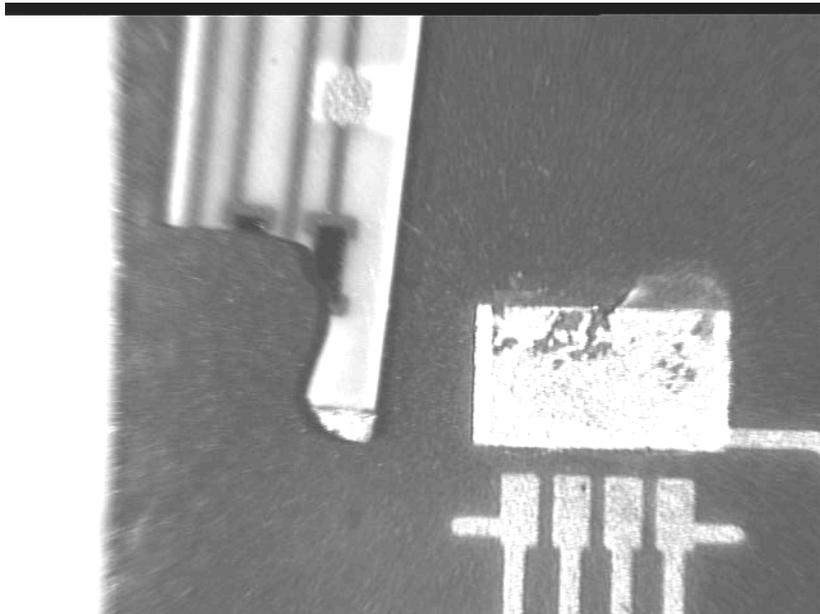


Figure 3-12. Faces de rupture (test 00-906) : procédure de brasure standard, sur acier – diélectriques ESL 4916 – Her GPA 98-029. Poutre  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .  
Deux modes de rupture sont observés : rupture de la brasure et rupture de la poutre.

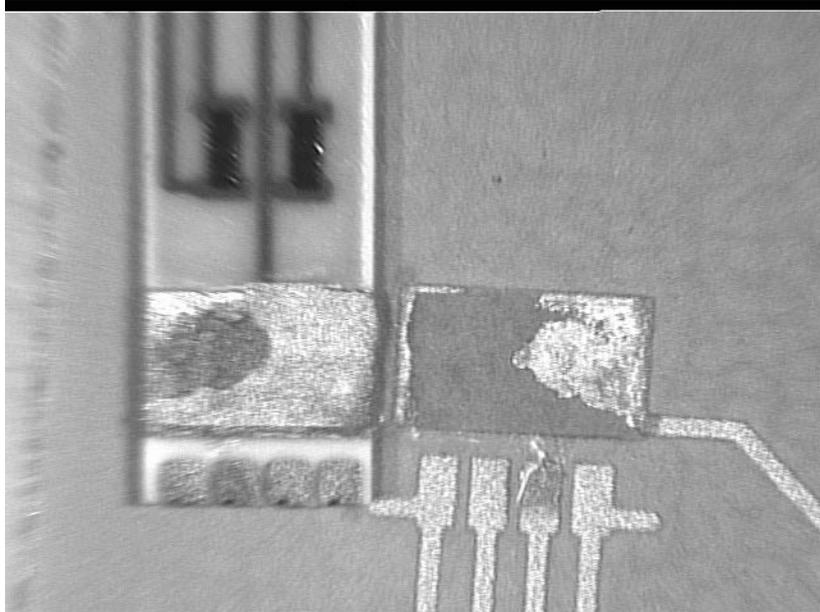


Figure 3–13. Faces de rupture (test 00-910) : procédure de brasure standard, sur acier – diélectrique ESL 4916 – ESL 4702. Poutre Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.  
Le conducteur se décolle du diélectrique ESL 4702, ou ESL 4702 cède en surface (difficile à déterminer). Sur une partie de la surface, c'est la brasure qui cède.

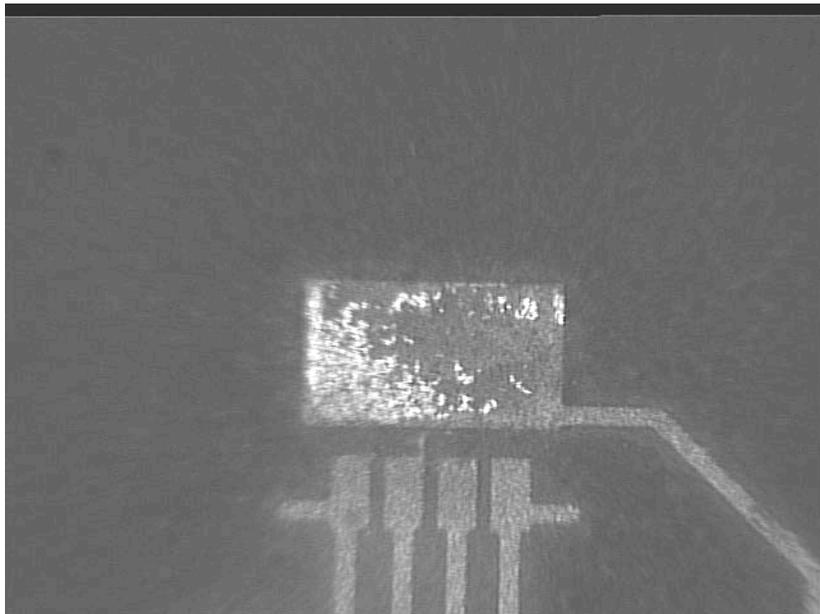


Figure 3–14. Faces de rupture (test 00-903) : procédure de brasure standard, sur titane non allié – diélectriques Her IP065 – Her GPA 98–029. Poutre Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.  
Sur une partie de la surface, c'est la la brasure qui se détache du conducteur, ce qui indique un mauvais mouillage du conducteur par la brasure.

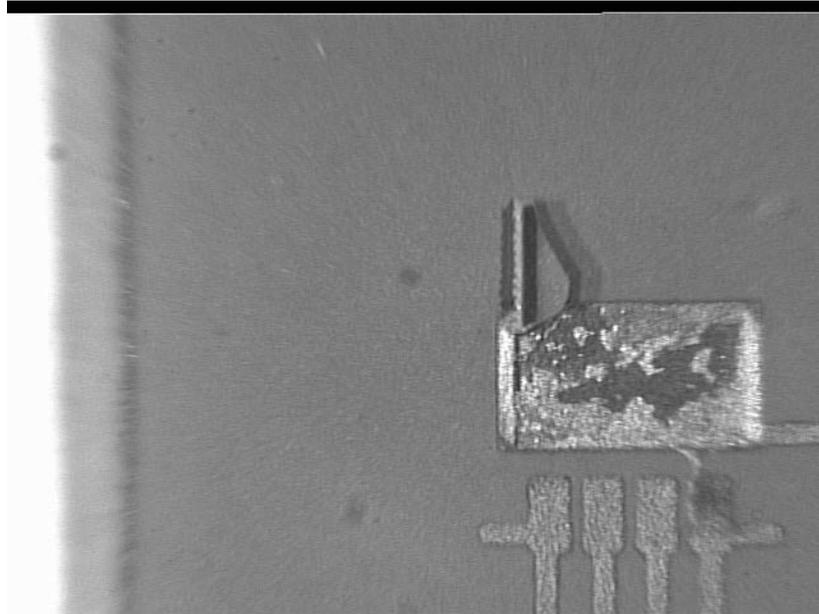


Figure 3–15. Faces de rupture (test 00-909) : procédure de brasure standard, sur titane non allié – diélectriques Her IP065 – ESL 4702. Poutre  $Al_2O_3$ .

Trois modes de rupture sont ici observés : rupture de la brasure (la plupart de la surface), rupture de la poutre et détachement de la brasure du conducteur (voir ci-dessus). Le mouillage n'est donc pas très bon.

#### 4. Conclusions et perspectives futures

L'objet de cette étude était l'évaluation de la résistance mécanique de l'assemblage, par brasure tendre eutectique Ag–Sn, de la poutre MilliNewton sur son embase, avec le conducteur ESL 9635B comme métallisation.

##### Etude de la procédure de brasage

L'étamage d'une des plages, suivie par l'assemblage, semble être une bonne méthode de réaliser des assemblages fiables. Pendant la phase d'étamage, la colophane contenue dans la pâte de brasure remonte à la surface, ce qui donne une couche de brasure largement exempte de gros pores. Ensuite, lors de l'assemblage de la poutre sur l'embase, la couche de colophane à la surface garantit un bon mouillage de la plage non encore étamée.

Si on veut obtenir les mêmes résultats sans colophane (circuits à haute impédance très sensibles aux courants de fuite), il est recommandé d'étamer les deux faces et nettoyer la couche de brasure avant l'assemblage. En l'absence de colophane, le mouillage ultérieur de la face non étamée est sujet à caution.

Une augmentation de l'épaisseur de la brasure tend à diminuer la résistance mécanique du joint et rend l'évacuation de la colophane un peu plus difficile, ce qui augmente un peu la porosité. Idéalement, l'épaisseur doit être le minimum nécessaire pour garantir une liaison fiable sur toute les plages de brasure.

La question de la rigidité optimale du joint minimisant les effets d'hystérèse tout en garantissant une résistance mécanique suffisante est encore mal connue à ce jour. L'optimum dépend probablement de l'épaisseur de la poutre. Ce thème devra être traité dans le futur, en examinant l'effet de différentes géométries de brasage.

## Etude des substrats / des diélectriques

Sur le substrat de référence (**alumine**), l'adhérence du conducteur ESL 9635B n'est pas limitante. Ce n'est pas le cas sur la **zircone**, où des décollements ont été observés. Ceux-ci ne sont pas dus à la dégradation par la brasure, car la tendance au décollement est indépendante de l'épaisseur de conducteur. Ce fait est d'autant plus fâcheux qu'une poutre en zircone sollicite potentiellement son assemblage beaucoup plus qu'une poutre de mêmes dimensions en alumine. Il faudra donc trouver un système de matériaux, incluant peut-être aussi une couche intermédiaire de verre ou de diélectrique, qui garantit une meilleure adhérence sur zircone. Malgré ce bémol, l'adhérence de ESL 9635B obtenue sur zircone est déjà suffisante pour l'assemblage de poutres minces.

Sur **acier**, l'adhérence du diélectrique sur le substrat semble être le facteur limitant sur lequel les efforts d'amélioration doivent être portés. Il semble qu'une gradation des contraintes entre l'acier et le diélectrique supérieur donne de meilleurs résultats, mais ces conclusions doivent encore être confirmées par des essais à plus grande échelle.

A l'inverse de la situation sur acier, l'adhérence du diélectrique sur **titane** est excellente moyennant une couche de fond de verre Her IP065, ce qui a déjà été observé qualitativement dans de nombreuses études précédentes. Dans ce cas, le point le plus critique est d'éviter la remontée de Her IP065 dans la métallisation, dont il affecte la mouillabilité par la brasure. On utilise donc un diélectrique "authentique" entre Her IP065 et la métallisation (et les résistances, etc.), dont l'épaisseur doit être suffisante pour bien encapsuler la couche de Her IP065.