

## LE SCCELLEMENT DES FIBRES OPTIQUES SANS METALLISATION: quelques conseils

Raymond L. Dietz\*  
Diemat, Inc., 19 Central St., Byfield, MA 01922

Adaptation française par Jean Lepagnol, ingénieur IEG, C.D.S. s.a.

### RESUME

Ce document décrit une méthode alternative de scellement des fibres optiques dont résulte en un coût beaucoup plus faible que la soudure, une bien meilleure fiabilité et un moindre risque de mauvais alignement des fibres. Cette méthode met en jeu l'utilisation de préformes d'un verre basse température (320°C) grâce auxquelles le scellement est effectué directement sur la fibre nue, sans les métallisations coûteuses nécessitées par le soudage. On décrira plusieurs procédés de mise en œuvre en montrant des coupes micrographiques de fibres scellées dans un manchon. On discutera également de l'impact des paramètres importants que sont la longueur du joint, le diamètre intérieur du tube et le matériau constituant le tube sur la conception d'un joint fiable, hermétique et exempt de tensions internes. Des informations sur la fiabilité seront présentées afin de démontrer la validité de cette technique pour réaliser des joints hermétiques de fibres optiques dans des tubes de connexion de boîtiers.

**Mots clefs:** soudure en verre, verre de soudure, joints hermétiques, verres de scellement, joints de fibres optiques à basse température.

### 1. INTRODUCTION

La demande de fibres optiques scellées hermétiquement continue de croître sous l'impulsion des exigences de performance et de fiabilité de l'industrie des télécommunications. L'application la plus importante pour le scellement hermétique des fibres est pour le passage dans la paroi d'un boîtier optoélectronique, dont le plus courant est le boîtier *papillon*. Le couplage de la lumière émise par un laser semiconducteur nécessite une méthode pour fixer la fibre de façon à obtenir un alignement précis pendant toute la durée de vie du dispositif optique. Un simple déplacement d'une fraction de micron peut réduire la puissance de couplage dans une proportion importante (1). L'exigence de fiabilité conduit à exclure l'utilisation de colles époxy, à cause du dégazage, du glissement et du risque de dégradation dans le temps. La méthode habituelle consiste à métalliser la fibre et à la braser dans un tube métallique qui est ensuite lui-même soudé dans la paroi du boîtier. Bien que cette méthode résolve plusieurs des problèmes de fiabilité rencontrés avec la méthode epoxy, la soudure a d'autres inconvénients. La nécessité de métallisation des fibres est non seulement coûteuse mais introduit aussi d'autres sources de non-fiabilité (1).

Il est clair qu'il faut une autre méthode pour remédier aux défauts inhérents aux deux méthodes citées. Dans ce document, on décrit un verre de soudure à basse température ainsi qu'un procédé pour faire des scellements de fibres optiques fiables et avec un coût nettement inférieur à celui de la soudure. Comparé à celle-ci, le scellement par verre basse température élimine le coût de la métallisation et les problèmes liés à l'utilisation d'une atmosphère contrôlée, les problèmes de délai de livraison et de stock. En outre, le verre offre une très bonne résistance à la corrosion, une grande stabilité dimensionnelle ainsi qu'une bonne résistance au glissement. Un autre avantage notable est que le verre, contrairement à la soudure, n'a pas besoin d'une atmosphère non oxydante. En pratique les joints peuvent être réalisés à l'air ambiant.

### 2. PROPRIETES D'UN JOINT SCELLE

A part les conditions d'herméticité spécifiées par Telecordia, les joints de fibres optiques dans une traversée de la paroi d'un boîtier doivent répondre à plusieurs autres exigences:

C. D. S.

- Résistance mécanique maintenue pendant les tests de fiabilité de Telecordia.
- Résistance à la corrosion dans différents environnements tels que chaleur humide.
- Très bonne résistance au glissement pour éviter de détruire l'alignement de la fibre dans le boîtier.
- Assemblage facile, si possible sans paramètres de mise en œuvre particuliers.
- Faible coût global (produits, stock, procédé).
- Faible tension résiduelle sur la fibre.

On a utilisé des joints en epoxy ou en d'autres polymères, mais ils ne correspondent pas aux conditions d'herméticité après vieillissement en chaleur humide (2). Ils peuvent aussi glisser et se dégrader mécaniquement. Pour les produits haut-de-gamme, on a remplacé l'epoxy par des joints soudés, par exemple avec l'alliage Au/Sn. On élimine ainsi la plupart des problèmes rencontrés avec l'epoxy, mais il y a plusieurs inconvénients. Le plus important réside sans doute dans la nécessité de métalliser les fibres pour obtenir un mouillage par la soudure. Pour métalliser les fibres, on dépose plusieurs couches métalliques par sloopage ou par évaporation; dans tous les cas, le procédé est très coûteux. L'adhérence de ces couches pendant la durée de vie du composant est très critique. On a observé une délamination des métallisations après cycle thermique (-40°C - +85°C) à l'endroit de la fibre où la métallisation se termine (1). Les problèmes de délai de livraison et de stockage constituent encore des inconvénients lorsque l'on utilise la soudure.

### 3. QU'EST UN VERRE DE SOUDURE ?

Ou mieux, *que n'est pas un verre de soudure?* De façon erronée, on peut penser qu'il s'agit d'un mélange de verre et d'alliage de soudure. Ce n'est pas le cas. Le terme verre de soudure a initialement été utilisé pour décrire un verre basse température, à haute teneur de plomb, destiné à joindre ou *souder* deux substrats de verre. Voici les principales différences entre la soudure (alliages de soudure ou de brasure) et le verre de soudure:

1. Le verre de soudure est constitué d'un mélange d'oxydes métalliques alors que la soudure est constituée d'un mélange ou *alliage* de métaux. Le verre de soudure ne contient pas de métaux sous forme métallique et la soudure ne contient normalement pas d'oxydes.
2. Selon les énergies superficielles, le verre de soudure peut mouiller les oxydes et certaines surfaces métalliques alors que la soudure ne mouille que les surfaces métalliques non oxydées.
3. A sa température de fusion, la soudure change brutalement de viscosité. Le verre de soudure, quant à lui, voit sa viscosité varier de façon contrôlée selon la température, ce qui permet de contrôler le mouillage.
4. Par comparaison aux alliages de soudure, les verres de soudure sont généralement plus durs, ont un module d'élasticité élevé et une bonne résistance au glissement. Cependant les alliages Au/Sn ont des caractéristiques comparables à celles des verres.
5. Le verre de soudure peut être utilisé à l'air tandis que les soudures métalliques nécessitent généralement des atmosphères réductrices de façon à ce que le mouillage puisse avoir lieu sur une surface exempte d'oxydes.

### 4. LES PROPRIETES D'UN VERRE DE SOUDURE

Sous la désignation DM2700PF, le verre de soudure a les propriétés suivantes:

Coefficient de dilatation (ppm/°C)	7.5
Température de transition vitreuse (Tg) (°C)	215
Point de ramollissement (°C)	280
Densité	7.6
Température de mise en œuvre (°C)	320 - 350

Ce verre peut être approvisionné en préformes de formes et dimensions variées pour sceller des composants tels que des fibres optiques, des lentilles, des manchons, des pointes de traversée, des capots etc... Les préformes sont obtenues par pressage à partir de poudre, puis frittées en forme. Le frittage ne laisse pas de résidu et lors de la refusion, il n'y a pas de dégazage.

## 5. LE PROCEDE DE JONCTION PAR VERRE DE SOUDURE

Cet exposé est consacré au scellement de fibres optiques (4). En général on réalise d'abord un joint préliminaire en scellant la fibre dans un tube ou un manchon formant un *assemblage en natte*. On enlève d'abord le revêtement organique de la fibre dans le voisinage immédiat du joint et on l'introduit dans le manchon en laissant une longueur suffisante de fibre dénudée pour réaliser ultérieurement l'alignement à l'intérieur du boîtier.

On place ensuite une préforme de verre sur la fibre dénudée. Cette préforme reposera sur la surface supérieure du manchon. On chauffe ensuite localement le manchon. Les méthodes sont décrites plus loin. Afin d'éviter d'abîmer le revêtement organique, on associe généralement le chauffage localisé avec un radiateur placé à l'autre extrémité du manchon où subsiste le revêtement organique. Le montage est ensuite scellé dans la paroi du boîtier avec un alliage de soudure tel que Au/Sn. Les différentes étapes sont illustrées ci-après.

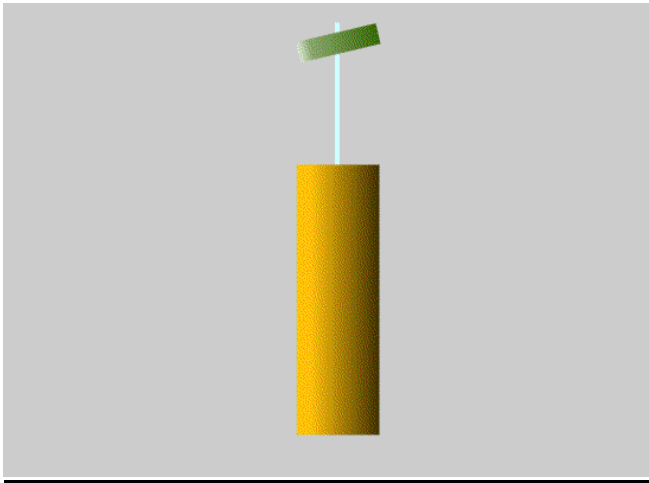


Figure 1. Après avoir dénudé et nettoyé la fibre, on place la préforme sur la fibre afin qu'elle repose sur la surface supérieure du manchon.

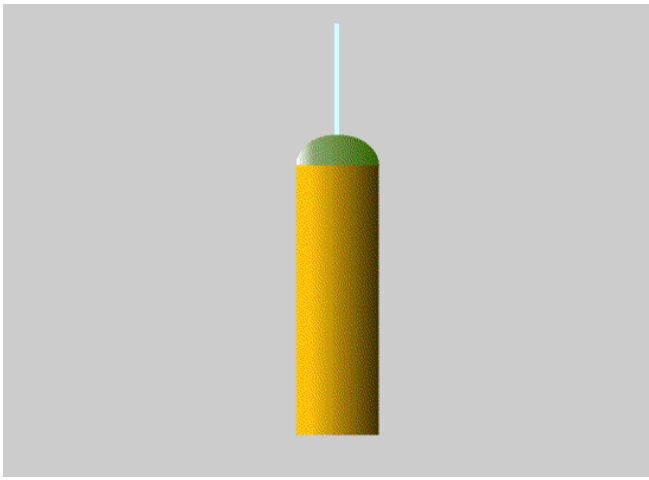


Figure 2. On chauffe la préforme jusqu'au point de fusion du verre. Il se produit alors un affaissement et le mouillage de l'intérieur du manchon.

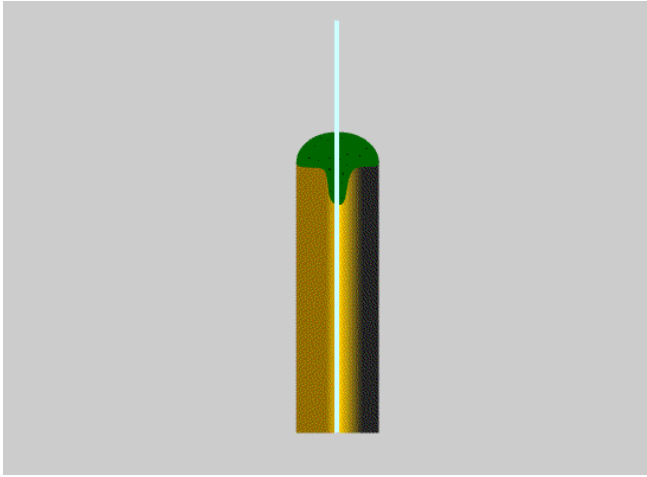


Figure 3. Coupe montrant le mouillage à l'intérieur du manchon et autour de la fibre.

## 6. METHODES DE CHAUFFAGE POUR FORMER UN JOINT.

Pour réaliser la fusion du verre en vue de former un joint hermétique, plusieurs méthodes sont proposées:

1. La méthode la plus courante consiste probablement à chauffer le manchon par induction RF. On peut ainsi chauffer localement très vite. On dispose de petits enroulements ajustés autour du manchon métallique. Le champ RF généré chauffe la manchon qui ensuite chauffe et fait fondre le verre. Il faut des manchons qui absorbent l'énergie RF.
2. Le chauffage par résistance électrique peut être réalisé avec des électrodes en contact avec le manchon. Cette méthode est également rapide et localisée mais nécessite un manchon conducteur électrique.
3. Le chauffage par rayonnement IR au moyen d'un filament à proximité du joint est une méthode efficace qui ne dépend pas de la nature du matériau constituant le manchon. Par exemple, avec cette méthode, on pourrait utiliser des manchons en céramique ou en quartz.
4. On peut utiliser efficacement un chauffage par air chaud ou au gaz dans les applications où le manchon n'est pas obligatoirement en métal. En particulier, un générateur de microflamme peut s'avérer très efficace pour chauffer de façon localisée sans endommager les composants voisins.
5. Le laser est également très efficace pour obtenir un chauffage localisé indépendant du type de manchon. Le verre de soudure absorbe l'énergie des lasers  $\text{CO}_2$ .
6. On peut chauffer également par conduction. Dans ce cas, la source de chaleur est mise en contact avec la pièce à chauffer, comme avec un fer à souder. L'inconvénient majeur de cette méthode est que la vitesse de chauffage dépend de la conductivité et de la masse thermique du manchon.

## 7. TENSIONS DANS UN JOINT DE VERRE.

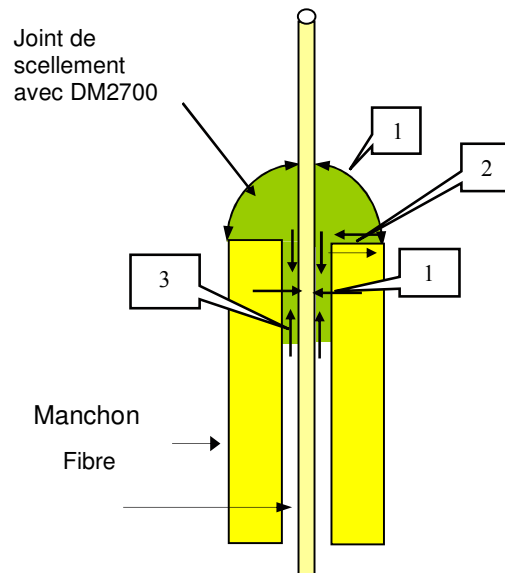


Figure 4. Analyse des tensions dans un joint.

La tension radiale [1] dans la calotte du joint est contrôlée par l'expansion du verre qui est plus élevée que celle du manchon ou de la fibre. Il en résulte une tension en compression à l'interface de la fibre. Ceci améliore l'étanchéité du joint. Mais si la tension est trop importante, la fibre risque d'être fragilisée. La tension de cisaillement [2] à la surface supérieure du manchon dépend des coefficients de dilatation relatifs entre le verre de scellement et le manchon. La tension axiale de cisaillement [3] le long de la paroi du manchon est également le résultat d'une différence des coefficients de dilatation entre le verre et le manchon.

Avec les calottes de plus grande dimension, la tension de compression sur la fibre sera plus importante. La dimension de la calotte est déterminée par le diamètre extérieur du manchon. Le verre ne s'écoule pas le long de l'intérieur du manchon tant qu'une calotte n'est pas formée par le verre sur la face supérieure du manchon. A moins d'utiliser une préforme plus épaisse ayant un volume plus important, l'herméticité sera médiocre car le joint est trop court. Dans les conditions idéales, le mouillage du verre dans le tube assure l'herméticité ainsi que la résistance mécanique du joint. Ceci se vérifie par une traction dans l'axe de la fibre. Pour des manchons dont le coefficient de dilatation est faible ou moyen, on peut avoir des tensions excessives à la surface supérieure du manchon du fait de la différence des coefficients de dilatation entre le verre et le manchon. Le mouillage du verre sur des manchons de grand diamètre extérieur est schématisé en figure 5.

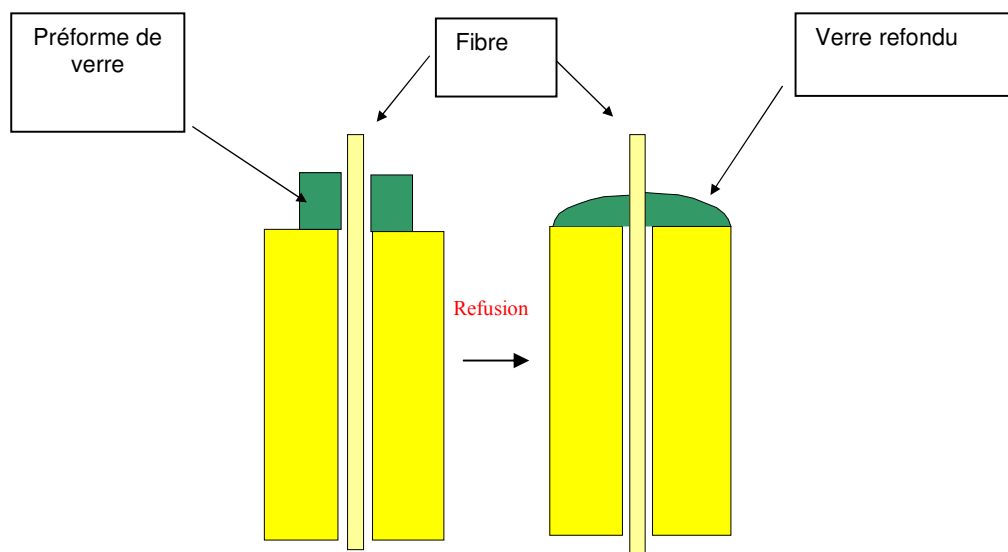


Figure 5. Mouillage du verre sur une surface de grande dimension au dessus du manchon.

Pour des manchons de grand diamètre, on peut contrôler le mouillage sur la face supérieure en créant une discontinuité telle qu'un chanfrein schématisé en figure 6.

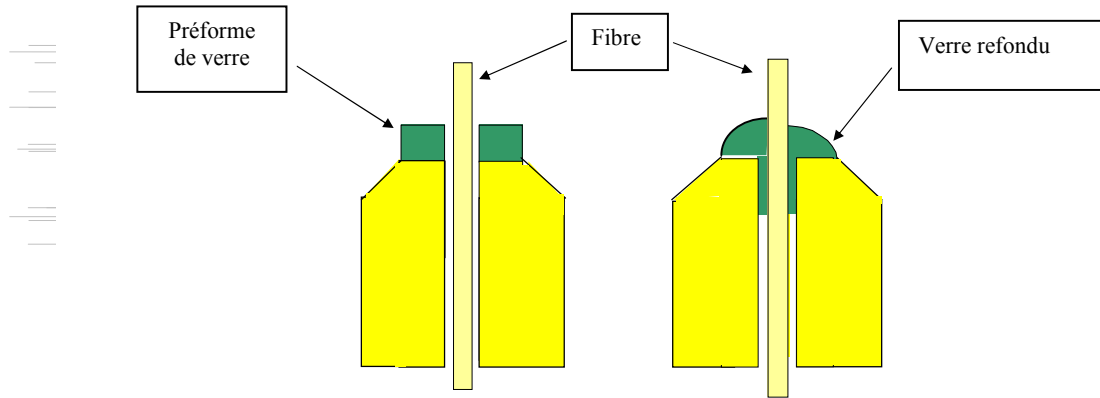


Figure 6. Volume de la préforme adapté à la surface supérieure du manchon pour permettre le mouillage du verre à l'intérieur du tube.

A l'intérieur du manchon (figure 7), il y a une force de compression sur la fibre qui dépend du diamètre intérieur (ID) du manchon, du matériau et de son coefficient de dilatation, et de l'épaisseur de la paroi du tube. La température de transformation du verre ( $T_g$ ), le module de Young ( $E$ ) ainsi que le coefficient de dilatation ( $\alpha$ ) auront, comme on peut s'y attendre, aussi une influence sur la tension radiale dans le verre. Ceci est illustré en figure 7.

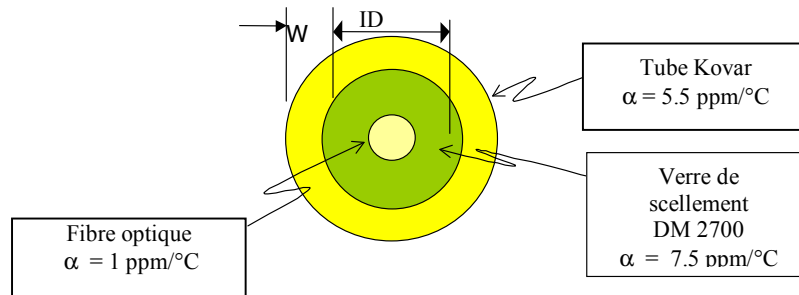


Figure 7. Section du manchon montrant la fibre scellée avec le verre de soudure.

Pour un manchon en kovar courant, avec une fibre scellée à l'intérieur, la tension radiale ( $S_g$ ) dans le verre peut être exprimée par la formule suivante (3):

$$S_g = \frac{2a E_m (\Delta CTE) \Delta T}{1 + 2ab} \quad (3)$$

Où

ID est le diamètre intérieur du tube

W est la largeur de la paroi du tube

$E_m$  est le module de Young du métal

$E_g$  est le module de Young du verre

CTE sont les coefficients d'expansion du verre (g) et du métal (m).

$a = ID/W$

$b = E_m/E_g$

$\Delta CTE = CTE_m - CTE_g$

$\Delta T = T_g - \text{température ambiante}$

Lorsque le diamètre intérieur (ID) augmente, la tension dans le verre ( $S_g$ ) entraîne une tension telle que finalement le verre se détachera de la paroi intérieure du manchon. On a observé, à partir de microsections de joints dans un manchon, que le diamètre intérieur maximum est environ 1 mm avec un diamètre extérieur de 1.4 mm. On notera que selon la formule ci-dessus l'augmentation de l'épaisseur de la paroi réduit ( $S_g$ ), et qu'une diminution du module de Young du verre ( $E_g$ ) ou du matériau constituant le manchon ( $E_m$ ) réduira également ( $S_g$ ).

Lorsque le tube ou le manchon a un coefficient de dilatation plus élevé, comme l'acier inoxydable, le verre sera toujours en compression car le tube en acier inoxydable a un coefficient de dilatation supérieur à celui du verre DM2700. Ainsi, pour les tubes ayant un coefficient de dilatation plus important, le diamètre intérieur du tube n'est limité que par le volume de verre nécessaire et la sensibilité de la fibre à la compression. Par ailleurs, un diamètre extérieur de grande dimension entraînera la formation d'une capsule de verre importante à la surface supérieure du manchon, ce qui entraînera une compression excessive de la fibre, la fragilisant. A l'inverse, pour des tubes dont le coefficient de dilatation est faible –comme le quartz– la dimension maximale doit être plus faible afin de minimiser le risque de démontage du verre sur la face intérieure du tube du fait des tensions interfaciales générées par la différence entre les coefficients de dilatation du verre et du matériau constituant le manchon.

Pour les manchons à faible dilatation, comme le quartz, on peut contrôler les tensions en traction en utilisant des contre-perçages de faible diamètre permettant au verre de réaliser un scellement tout en minimisant les tensions sur la paroi intérieure du contre-perçage. Ceci est schématisé figure 8. Pour un manchon en quartz fondu, le diamètre maximum doit être d'environ 0.25mm.

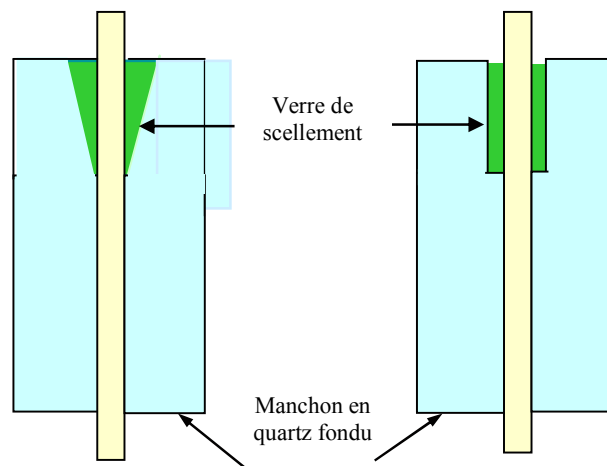


Figure 8. Manchon en quartz fondu, avec perçage de petit diamètre et contre-perçage pour réduire les tensions radiales.

### 8. TENSION ASYMETRIQUE

Lorsque le diamètre de perçage du manchon est notablement plus important que celui de la fibre nue, celle-ci sera décentrée et la tension sur la fibre sera asymétrique. On a étudié l'impact de ce type de tension sur la fibre en maintenant la fibre sur un coté pendant le scellement et en effectuant un essai de courbure schématisé ci-dessous (figure 9). Les résultats sont donnés en figure 10.

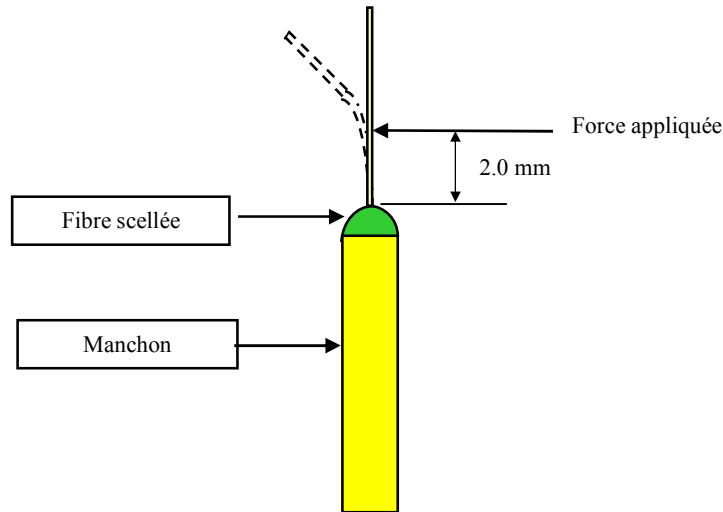


Figure 9. Test de courbure de la fibre pour mesurer sa résistance à la rupture (4)

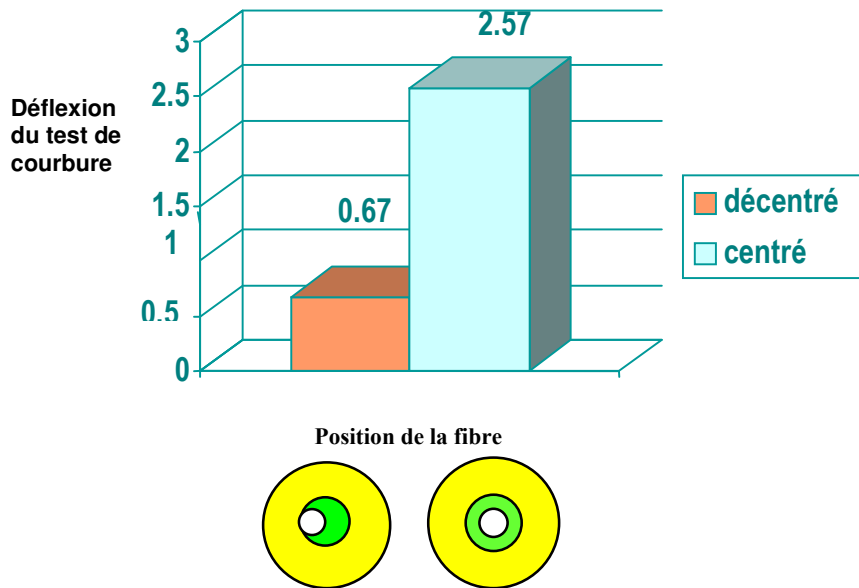


Figure 10. Impact du décentrage de la fibre dans le manchon sur le test de courbure de la fibre.

L'augmentation de la tension, mesurée par la déflexion avant rupture de la fibre a aussi été calculée par la méthode des éléments finis (1). Bien que le test de courbure fasse apparaître une différence notable de la tension



résiduelle due au décentrage, cette différence n'est pas très importante tant que la fibre n'est pas proche de la paroi du trou et tant que la capsule n'est pas elle-même décentrée. On a observé de nombreuses coupes micrographiques correspondant à des courbures faibles et des courbures importantes sans que l'on puisse corréler les résultats avec la position de la fibre à la surface supérieure du manchon. Il est possible que la direction de la force appliquée soit une variable importante, mais ce paramètre n'a pas été pris en compte. Il faut être conscient du problème de décentrage, mais ce n'est que dans des cas extrêmes qu'il influence vraiment la tension sur la fibre. Une façon de compenser cet effet est d'utiliser des manchons ayant un faible diamètre de perçage avec une contre-trou, représenté figure 11. Le faible diamètre permet de centrer la fibre et le contre-trou permet d'obtenir la longueur de joint nécessaire.

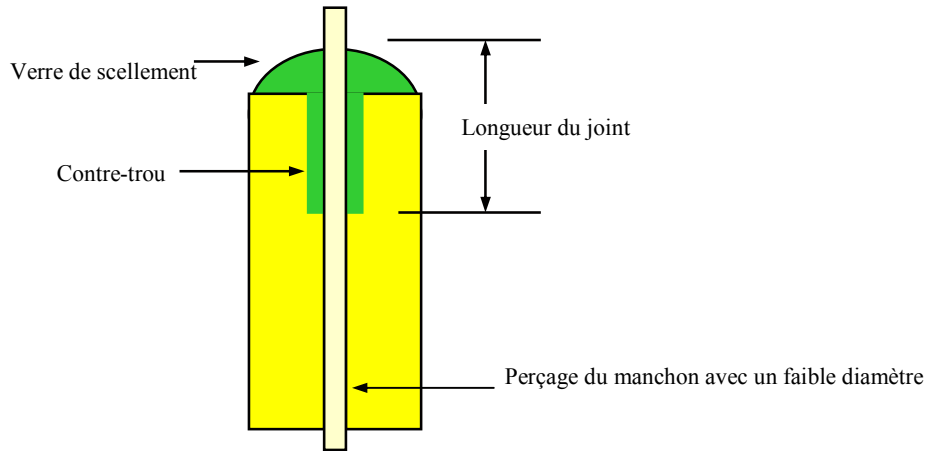


Figure 11. Centrage de la fibre dans un trou de faible diamètre et scellement avec un contre-trou.

## 9. GUIDE POUR LA CONCEPTION

Les conseils pour utiliser d'un verre de soudure et minimiser les tensions sont résumés ci-après :

- 1 Choisir la préforme dont le volume permettra d'obtenir une longueur de joint suffisante compte-tenu du mouillage du verre par capillarité dans le tube ou le manchon. Les dimensions de la préforme ne sont pas aussi critiques que le volume de verre après fusion. Le volume est déterminé par les diamètres intérieur et extérieur ainsi que par l'épaisseur de la préforme. En général, on peut adapter l'épaisseur d'une préforme donnée sans avoir besoin d'un nouvel outillage. Pour augmenter l'épaisseur, on ajoute de la poudre de verre dans le moule. Comme la préforme se déformera autour de la fibre lors de la fusion, les dimensions (diamètres extérieur et diamètre intérieur) ne sont pas critiques. Prévoir une réduction en volume de l'ordre de 15% entre la préforme et le verre une fois fondu.
- 2 Choisir les dimensions du manchon de telle sorte que les tensions axiales et radiales soient minimales, comme indiqué précédemment. Ceci dépend du matériau utilisé et de son coefficient de dilatation.

MATERIAU UTILISE POUR LE MANCHON	DIAMETRE INTERIEUR MAXIMUM (mm)
Dilatation élevée (Acier inoxydable)	1
Dilatation moyenne (Kovar)	0.65
Faible dilatation (Quartz fondu)	0.25

- 3 Minimiser la surface de mouillage supérieure du manchon afin que le verre de soudure forme un dôme et mouille l'intérieur du manchon ou du contre-trou. Il suffira généralement de limiter le diamètre extérieur ou le diamètre de la surface mouillable à 1 mm. Pour les manchons ayant une dilatation élevée, le diamètre extérieur est plus critique car on risque de fragiliser la fibre à cause des tensions de compression.

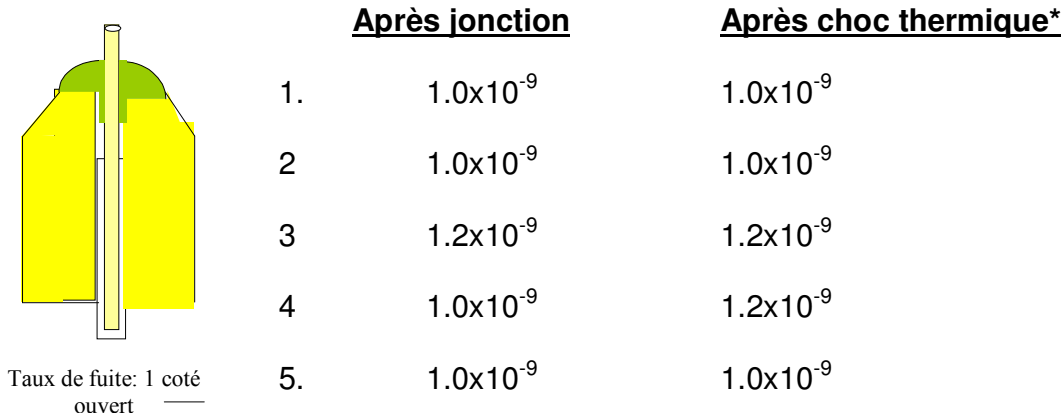
- 4 Chauffer le manchon par une des méthodes décrites précédemment afin d'atteindre une température minimale de 320°C à l'interface. Eviter de dépasser 420°C en température de pic. On recommande une montée rapide en température afin d'éviter que les ingrédients qui modifient le coefficient de dilatation ne se dissolvent partiellement dans le verre, ce qui augmenterait la viscosité et la température nécessaire au scellement. Selon la température de pic, la durée va de 1 à 15 secondes.

## 10. FIABILITE DU SCELLEMENT DES FIBRES PAR VERRE DE SOUDURE.

### 10.1. Herméticité

Si l'on suit les conseils ci-dessus, les montages de fibres effectués avec du verre de soudure sont très fiables et passent les spécifications Telecordia (4).

En comparaison avec les joints effectués avec des soudures métalliques, les joints réalisés avec du verre de soudure ont généralement moins de tensions internes et une meilleure fiabilité (1). L'étanchéité est maintenue pendant les essais climatiques. On a pu démontrer ceci lors de tests internes en mesurant le taux de fuite par la méthode d'un côté ouvert avec des manchons en kovar. Les taux de fuite ont été mesurés avant et après le choc thermique liquide-liquide.



\* = 5 fois eau bouillante – eau glacée.

Tableau 1. Taux de fuite d'une fibre scellée dans un manchon en kovar  
( Atmosphere – cm<sup>3</sup>/seconde)

### 10.2 Résistance à la corrosion.

Pour évaluer la résistance à la corrosion, on a effectué un test en chaleur humide (85°C – 85% humidité relative) du verre de soudure avant et après le scellement. On a ensuite mesuré l'impact de ce traitement sur le test de courbure de la fibre. Les résultats sont résumés dans la figure 12 ci-dessous.

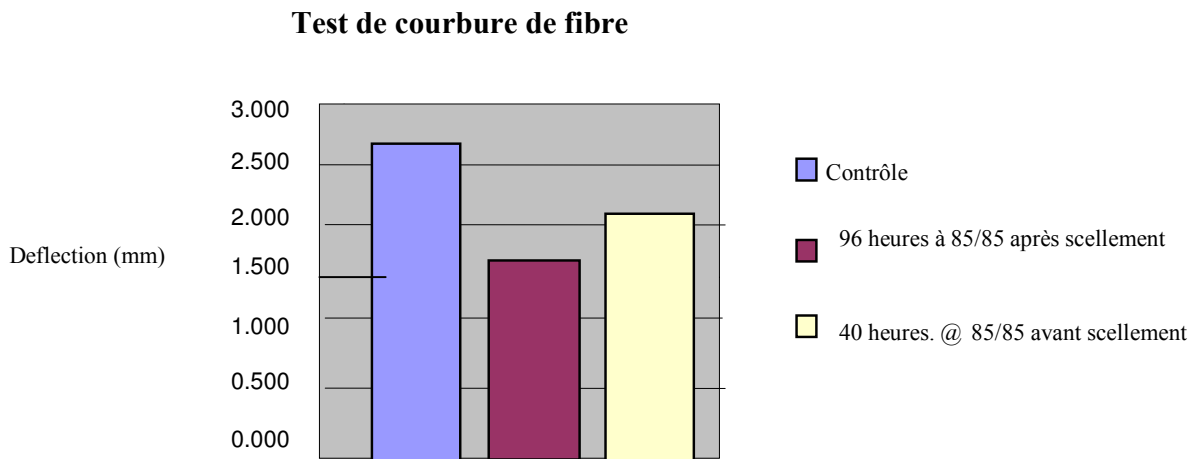


Figure 12. Impact de l'exposition à 85°C / 85% d'humidité relative sur le test de courbure de la fibre.

L'exposition de la préforme pendant 40 heures à la chaleur humide (85/85) avant le scellement n'a qu'une influence minimale sur les résultats de courbure de la fibre. Il en est de même lorsque après scellement, le joint est exposé à la chaleur humide pendant 96 heures.

## 11. CONCLUSIONS

Si l'on se rapporte aux propriétés des joints cités précédemment, on peut conclure qu'un verre de soudure basse température (DM2700) s'est révélé être une alternative valable pour les applications de scellement dans les assemblages optoélectroniques hermétiques. En éliminant les métallisations des fibres et les conditions spéciales nécessaires pour la soudure métallique, on peut notablement réduire le coût des montages scellés. Des conseils pour la conception ont été présentés afin de minimiser les tensions internes et de maximiser la fiabilité des joints. La faible tension observée lorsque les fibres sont scellées avec du verre rend ce type de montage utilisable pour les *fibres à maintien de polarisation* (1). La fiabilité a été démontrée par des essais d'utilisateurs selon les spécifications Telecordia ainsi que par des essais internes.

## REFERENCES

1. Mark Shaw, Robert Galeotti, Giacomo Coppo, "Method of Fixing an Optical Fibre in a Laser Package," *Electronic Components and Technology Conference*, 2001.
2. Fred Bushroe, "Getting Light in and out of Hermetic Optical Packages," *Optical Manufacturing*, **November/December**, 2000.
3. Richard M. Rulon, "Glass to Metal Seals" in *Introduction to Glass Science*, L.D. Pye, H.J. Stevens, and W.C. La Course, eds., pp. 661-703, Plenum Press, New York, 1972.
4. Developed and tested in conjunction with Bookham Technology.

\* [r-dietz@diemat.com](mailto:r-dietz@diemat.com); phone 978-499-0900; fax 978-499-8484; diemat.com