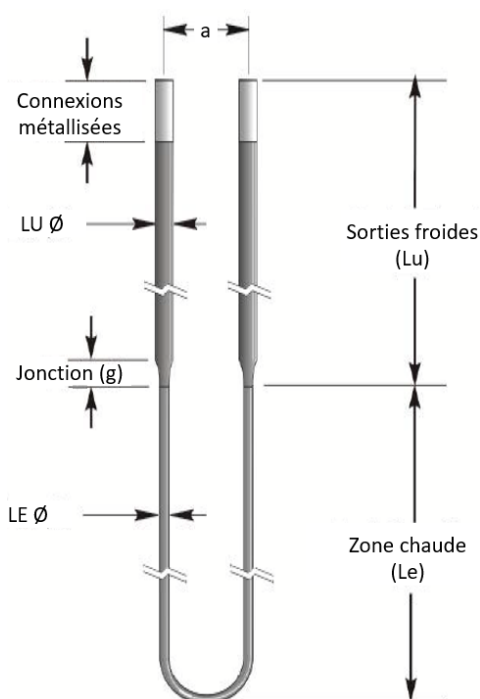


Dimensionnement des éléments en Bisiliciure de Molybdène (MoSi₂)

I. Dimensions et caractéristiques



- Table 1 -

Caractéristiques générales

| Diamètre <i>Le/Lu</i> (mm) | Entraxe (<i>a</i>) maxi (mm)* | | <i>Lg</i> jonction (mm) | <i>Lg</i> cnx métallisées (mm) | Electriques |
|----------------------------------|------------------------------------|----|-------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| | | | | | Ampérage maxi recommandé (A) |
| 3/6 | 20 | 25 | 15 | 25 | 75 |
| 4/9 | 20 | 25 | 18 | 40 | 115 |
| 6/12 | 40 | 50 | 25 | 40 | 200 |
| 9/18 | 50 | 60 | 30 | 75 | 365 |
| 12/24 | 60 | 80 | 40 | 100 | 560 |

II. Températures d'utilisation

Les éléments Moly-D peuvent être utilisés à des températures de surface jusqu'à 1775°C ou une température de four régulée à 1750°C en atmosphère oxydante. Une atmosphère réductrice est recommandée pour les températures inférieures. Préalablement à une utilisation en atmosphère neutre ou réductrice, il est important que les éléments soient mis en service dans l'air à une température supérieure à 1200°C afin de construire un film protecteur en dioxyde de silicium (40 min. sont suffisantes). Cette opération peut être reconduite régulièrement pour assurer une bonne protection dans le temps.

- Table 2 -

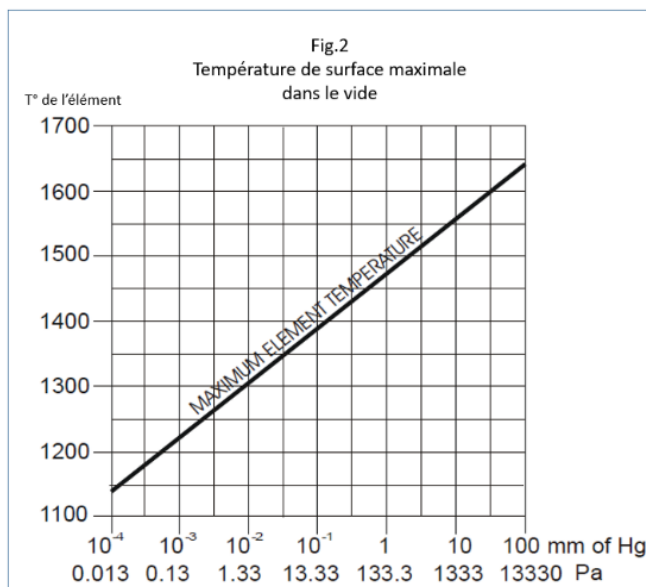
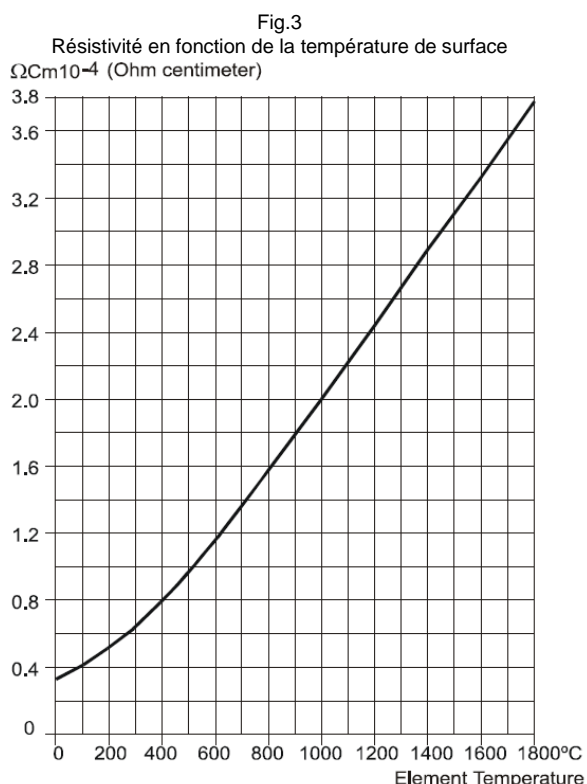
**Température de surface maximale recommandée
en fonction de l'atmosphère**

| Athmosphère | MD-31 (°C) | MD-33 (°C) |
|--|-----------------------|-----------------------|
| Air | 1700 | 1800 |
| Azote | 1600 | 1700 |
| Argon, Helium | 1600 | 1700 |
| Hydrogène Sec (point de rosée -80°C) | 1150 | 1150 |
| Hydrogène humide (point de rosée 20°C) | 1450 | 1450 |
| Gaz exothermique | 1600 | 1600 |
| Gaz endothermique | 1400 | 1400 |
| Amoniac craqué | 1400 | 1400 |

Pour une utilisation sous vide, la température de peau doit être déduite en fonction de la gamme de vide par le graphique ci-contre.

III. Caractéristiques électriques

Les résistances en MoSi₂ suivent les règles usuelles de la loi d'ohm. Or la résistivité évolue d'un facteur d'environ 10 entre 20°C et 1800°C (voir fig.3). Pour calculer la puissance d'un élément chauffant, il est tout d'abord nécessaire d'en connaître la température de surface maximale. Il sera ensuite possible de déduire la résistance de la zone chaude à l'aide du graphique (fig. 3).



La valeur ΩCm10⁻⁴ représente la valeur ohmique mesurée sur une section de MoSi₂ de 1cm² pour 1cm de longueur. Pour calculer la résistance d'une longueur chauffante, il faudra utiliser la formule suivante.

$$r = \frac{\rho \times l \times 4}{\pi \times d^2}$$

Où :

- r = résistance (en Ω)
- ρ = résistivité (issue du graphique ci-contre)
- l = longueur du fil (en cm)
- d = diamètre du fil (en cm)
- π = 3,14

Exemple :

Une résistance Ø3mm à 1675°C :

$$r = \frac{3.48 \times 10^{-4} \times 0.1 \times 4}{\pi \times 0.3^2}$$

$$r = 4.93 \times 10^{-4} \Omega$$

Nous pouvons observer une progression linéaire entre 1400°C et 1800°C. Le tableau ci-dessous présente la valeur ohmique mesurée pour les MD-31 et MD-33 à respectivement 1675°C et 1775°C.

- Table 3 -

| Dimamètre Lg chauffante (mm) | R en Ω par mm de longueur | |
|------------------------------------|---------------------------|-----------------|
| | MD-31 1675°C | MD-33 1775°C |
| 3 | 0,000493 | 0,000523 |
| 4 | 0,000277 | 0,000294 |
| 6 | 0,000123 | 0,000131 |
| 9 | 0,000054 | 0,000058 |
| 12 | 0,00003 | 0,000032 |
| 18 | 0,000013 | 0,000014 |

Ces valeurs nous permettront de calculer la résistance résultante pour un diamètre donné sur une plage de température de 1400°C à 1800°C en appliquant la formule suivante :

$$r_x = r_{1675^{\circ}\text{C}} \times (1 - (\Delta T^{\circ} \times 0.0006))$$

- où $\Delta T^{\circ} = 1675 - x$
- et $x = T^{\circ}$ de l'élément

IV. Dimensionnement d'une résistance MoSi2

A. Longueur de la zone froide

La zone froide est définie par 3 caractéristiques liées à une bonne mise en œuvre de l'élément chauffant. Pour éviter tout dysfonctionnement relatif à une surchauffe, il faut veiller :

- A respecter un dépassement des connexions froides d'une longueur « Lf » relative au diamètre de la résistance (voir table 4 ci-dessous)
- A positionner la jonction « g » dans la zone chaude du four.

Le calcul de longueur non-chauffante « Lu » est le suivant :

$$Lu = Lf + g + Li$$

Où Li est l'épaisseur de l'isolant du four

g est la longueur de la jonction (voir table 4 ci-dessous)

B. Longueur de la zone chauffante

Au-dessus de 1200°C, les résistances MoSi2 ramollissent. Le fluage est à prendre en considération, particulièrement lorsqu'un élément chauffant est monté à la verticale. Pour calculer la longueur chauffante « Le » maximale, utiliser les formules suivantes :

- Pour une hauteur utile de 200 mm et moins :
 $Le = H - 10 - g$
- Pour une hauteur supérieure à 200mm
 $Le = 0.95H - g$

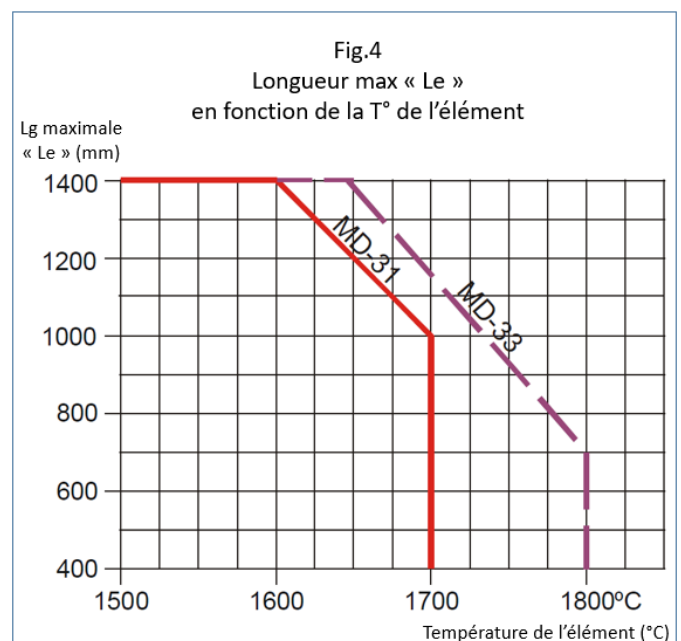
Où :

H est la hauteur utile du four

g est la longueur de la jonction (voir table 4 ci-dessous)

| Diamètre de la résistance (ØLu/ØLe) | 3/6 | 4/9 | 6/12 | 9/18 | 12/24 |
|---|------|------|-------|-------|-------|
| Dépassement de la connexion en dehors de l'isolant Lf | 75mm | 75mm | 100mm | 125mm | 150mm |
| Longueur de la jonction dans la chambre de chauffe g | 15mm | 15mm | 25mm | 30mm | 40mm |

En fonction de la température de la résistance, il est impératif de ne pas dépasser les longueurs que l'on peut déduire en lisant le graphique ci-dessous.



C. Calcul de la puissance

Le calcul de la puissance d'un élément MoSi2 s'obtient en plusieurs étapes.

1. Calcul de la surface d'échange

Exprimée en Cm², la surface d'échange est déduite en fonction du diamètre de la zone chauffante (d), de sa longueur (Le) et de son entraxe (a).

Avec toutes les dimensions en cm, la formule est la suivante :

$$S(\text{cm}^2) = \left(\left(Le - \frac{a}{2} - \frac{d}{2} \right) \times 2 + \frac{a}{2} \times \pi \right) \times d \times \pi$$

2. Déduction de la charge spécifique maximale

Exprimée en W/cm², la charge spécifique (ou densité de puissance) maximale s'obtient par relevé sur la courbe (fig.4) ci-contre. Il est avant tout nécessaire de déduire la température de surface maximale acceptable en fonction de l'atmosphère dans laquelle évolue la résistance (voir table n°2).

Par sécurité, nous retrancherons 3W/cm² au résultat obtenu.

3. Calcul de la valeur ohmique d'un élément

Lors du calcul de la résistance d'un élément chauffant, il est important de tenir compte des valeurs ohmiques des zones froides en les additionnant avec la résistance de la zone chaude.

Zones froides

La résistivité du matériau variant d'un facteur 10 entre 20 et 1800°C, nous ne pouvons donc pas considérer une résistivité linéaire sur l'ensemble de la zone froide.

Voici une méthode simplifiée permettant de calculer la valeur ohmique de la zone froide (Lu calculé en §VI-1) :

$$R_u = \frac{2 \times L_u}{1000} \times \frac{0,00196 \times T_f - 0,255}{D_{Lu}^2}$$

Où

R_u = Résistance totale des zones froides

L_u = Longueur d'une zone froide (Lu) en mm

T_f = Température du four en °C

0,255 = facteur de correction

D_{Lu} = Diamètre de la zone froide en mm

Zone chauffante

La résistance de la zone chauffante « Le » se calcul grâce à la formule suivante :

$$R_e = \frac{L_h}{1000} \times \frac{0,0028 \times T_e - 0,255}{d^2}$$

R_e = Résistance totale de la zone chauffante

L_h = Longueur développée de la zone chauffant = $\left(Le - \frac{a}{2} - \frac{d}{2} \right) \times 2 + \frac{a}{2} \times \pi$ avec a = entraxe

T_e = Température de surface de l'élément en °C

0,255 = facteur de correction

Résistance totale

La résistance totale d'un élément MoSi2 correspond à l'addition des 2 résistances calculées plus haut.

$$R_t = R_u + R_e$$

