

INT 192/97

Août 1997

SYSTÈME DE FIXATION POUR LES TUILES DE LA COLONNE  
CENTRALE ET DES ANGLES INTÉRIEURS DE LA CHAMBRE À VIDE  
DE TCV

R. Chavan

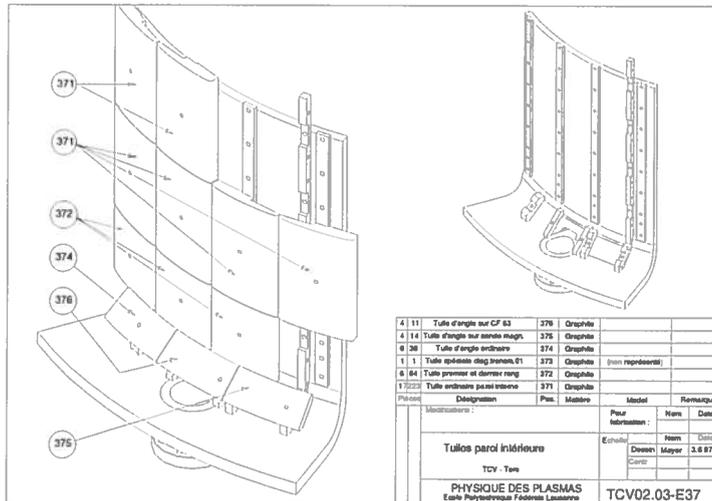
CENTRE DE RECHERCHES EN PHYSIQUE DES PLASMAS  
ASSOCIATION EURATOM - CONFEDERATION SUISSE  
ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE  
PPB - CH-1015 Lausanne - Switzerland

# Système de fixation pour les tuiles de la colonne centrale et des angles intérieurs de la chambre à vide de TCV

R. Chavan / CRPP - EPFL / juin 1997 / INT 192/97

## 1 Description du système

Le système de fixation de 'deuxième génération' de tuiles de la colonne centrale et des angles aux rayons intérieurs de la chambre à vide de TCV, doit répondre aussi bien à des critères liés aux conditions de fonctionnement, en particulier thermiques (configurations 'divertors' sur la colonne centrale), qu'à la mise en œuvre et au montage (env. 400 tuiles).



Le concept réalisé tient compte de la limitation de l'espace disponible, qui est de  $20 - 6 = 14$  mm en hauteur, et de l'échauffement prolongé des tuiles durant les étuvages à 350 °C. Une éventuelle exploitation physique 'à chaud' de TCV pourrait augmenter de façon transitoire (choque thermique) et en moyenne la température des tuiles de quelques centaines de degrés supplémentaires. L'acier dont est composée la chambre à vide (DIN 1.4429<sup>1</sup>) limite la température des parois à 600 °C environ. Par conséquent cette valeur constitue la limite supérieure de température de fonctionnement du dispositif de fixation. Au delà de 600 °C, le comportement très ductile et l'abaissement de la limite élastique de l'acier en dessous de 100 MPa ne permettent pas de prédire la tenue des taraudages dans les rails de fixation<sup>2</sup>. Un fluage d'un ou de plusieurs des composants aurait pour conséquence de modifier la précontrainte du système.

L'utilisation d'éléments élastiques tels que rondelles ou autres ressorts présentant trop de difficultés, la précontrainte élastique nécessaire au serrage est obtenue par un affaiblissement de la section de la vis et par la limitation du volume de graphite comprimé. Quelques centaines de tuiles furent fixées dans le tore selon ce principe et aucune défaillance n'a été constatée depuis la mise en service de TCV.

Toutefois les tuiles peuvent prendre du jeu à des températures dépassant environ 400 °C, puisque la précontrainte élastique, soit la compression du graphite et l'allongement de la vis obtenue à température ambiante, ne suffit plus pour compenser la dilatation thermique différentielle<sup>3</sup>.

L'élévation de la température de service maximale demandée nécessite par conséquent l'introduction d'un élément supplémentaire sous la forme d'une douille, permettant le maintien d'une force de traction sur la vis au-delà de 400 °C, afin d'empêcher son desserrage lors de variations de température cycliques. Limité par un appui latéral sur le rail et par le jeu transversal de la plaquette dans la tuile, un léger déplacement de la tuile est possible et représente un compromis acceptable. La douille fabriquée en acier inoxydable et montée avec un jeu initial a une dilatation thermique plus importante que la tuile et la vis.

Tableau 1: Comparaison des matériaux

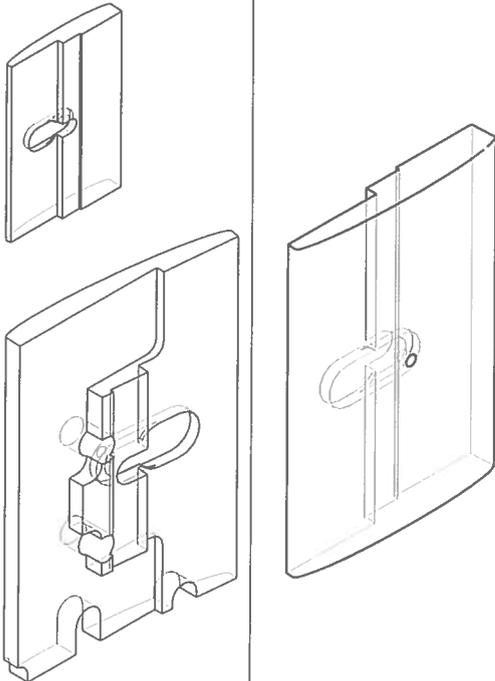
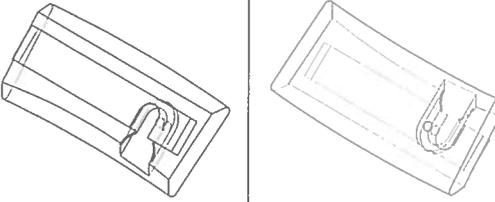
Matériau	Module d'élasticité $E$ [N/m <sup>2</sup> ]	Coefficient de dilatation thermique $\alpha$ [1/K]
acier DIN 1.4429 / 1.4435	$2 \cdot 10^{11}$	$17.5 \cdot 10^{-6}$
graphite SGL R 6650	$13.5 \cdot 10^9$	$3.5 \cdot 10^{-6}$
Nimonic 80 A	$2.1 \cdot 10^{11}$	$12.7 \cdot 10^{-6}$

En ajustant les différentes 'longueurs' en fonction de la rigidité (constante de ressort) et de la dilatation thermique de chaque pièce, il est possible d'adapter la plage de température de fonctionnement de 20 à 600 °C.

Les pièces sont fabriquées et repérées selon les références figurant dans le tableau suivant :

1. Voir caractéristiques thermomécaniques de l'acier DIN 1.4429 dans 'Stahlschlüssel'.
2. Comparer les caractéristiques thermomécaniques de l'acier et du graphite.
3. Comparer les coefficients de dilatation thermiques du graphite et du Nimonic.

Tableau 2: Liste des pièces de fixation des tuiles

Désignation	Matériaux	Numéro de dessin	Schéma	
Tuiles graphite sur colonne	Graphite SGL R 6650	TCV02.03-371 TCV02.03-372 TCV02.03-373 TCV02.03-378 TCV02.03-379 TCV02.03-380 TCV02.03-381 TCV02.03-382 TCV02.03-383 TCV02.03-384 TCV02.03-385		
Tuiles graphite d'angle	Graphite SGL R 6650	TCV02.03-374.B TCV02.03-375.B TCV02.03-376.B TCV02.03-377.B		
Vis à tête conique M8	Inco Alloys Nimonic 80 A ®	TCV02.03-369		
Plaquette	Acier DIN 1.4435	TCV02.03-367		
Douille (entretoise)	Acier DIN 1.4435	TCV02.03-368		
Rail de fixation	Acier DIN 1.4429	TCV02.00-E04.D		

## 2 Calcul des interférences dimensionnelles

Bien qu'une approche mathématique du problème puisse paraître très théorique, un calcul se justifie si l'on tient compte du fait que les déformations élastiques sont du même ordre de grandeur que les dilatations thermiques et qu'il serait par conséquent difficile de déterminer les cotes nécessaires par simple estimation.

Dans tous les calculs, il sera admis par simplification que les matériaux se déforment proportionnellement à la contrainte à laquelle ils sont soumis et que les caractéristiques physiques ne varient pas en fonction de la température. Les effets transitoires de dilatation relative des pièces, résultant dans l'axe de la vis, ne sont pas pris en considération, car durées et modes d'échauffement et constantes de temps de montée en température sont suffisamment longs et similaires.

Les rails sont admis comme étant parfaitement rectilignes et plats et n'ont de ce fait pas d'influence sur l'état de contrainte de la tuile ou de l'assemblage. Le 'bombage' qui est conséquence de l'échauffement localisé en surface de la tuile et de sa dilatation inhomogène n'est pas pris en considération dans les calculs de force sur la vis.

La grandeur caractérisant l'état de contrainte de l'assemblage est la force de traction subie par la vis  $F_v$ . À partir du serrage initial à température ambiante  $T_0$  cette valeur varie de façon discontinue avec la température  $T$ , selon les jeux et les rigidités des pièces. Ces seuils délimitent trois domaines de température distincts, définis dans le tableau 2. :

Tableau 3: État de contrainte en fonction de la température

Température	Cas #	Etat de contrainte		
		Vis	Tuile	Douille
$T_0$		traction	compression	-
$T_0 < T < T_c$	I	traction	compression	-
$T_c$		traction	compression	contact
$T_c < T < T_{cc}$	II	traction	compression	compression
$T_{cc}$		traction	contact	compression
$T_{cc} < T$	III	traction	-	compression

Chaque valeur caractérisant une pièce est identifiée par un indice :  $v$  - vis,  $t$  - tuile,  $d$  - douille. Les variables sont la rigidité  $k$ , la longueur  $L$ , l'allongement élastique et non thermique  $\Delta$ , le coefficient de dilatation thermique  $\alpha$ , et l'élévation de température  $dT = T - T_0$ . Un allongement ou une compression sont définis à valeur positive, une valeur négative n'étant pas transmissible par la pièce.

### 2.1 Cas I : $T_0 < T < T_c$

La force sur la vis est uniquement déterminée par l'interférence dimensionnelle  $\Delta_v + \Delta_t$  entre la vis et la tuile, soit l'allongement de la vis et la compression élastique de la tuile.

$$F_v = k_v \cdot \Delta_v = k_t \cdot \Delta_t$$

L'allongement de vis étant limité à une valeur  $\Delta_v$  par la résistance du matériau, la compression de la tuile est exprimée par

$$\Delta_t = L_t - (L_v + \Delta_v)$$

Par substitution,

$$F_v = k_v \cdot \Delta_v = k_t \cdot [L_t - (L_v + \Delta_v)]$$

l'on obtient la valeur effective de l'allongement de la vis à température ambiante

$$\Delta_v = \frac{k_t(L_t - L_v)}{k_v + k_t}$$

Lors d'un échauffement de l'ensemble de  $dT$ , les pièces se dilatent d'un facteur  $(1 + \alpha dT)$ . L'allongement de la vis en fonction de la température s'écrit alors

$$\Delta_v = \frac{k_t[L_t(1 + \alpha_t dT) - L_v(1 + \alpha_v dT)]}{k_v + k_t} \quad \text{puis} \quad \begin{cases} F_v = k_v \cdot \Delta_v \\ \Delta_t = \frac{k_v}{k_t} \cdot \Delta_v \\ \Delta_d = 0 \end{cases} \quad (\text{Équ. 1})$$

### 2.2 Cas II : $T_c < T < T_{cc}$

Aux forces de traction de la vis et de compression de la tuile s'ajoute une force de compression de la douille dilatée, soit

$$F_v = k_v \cdot \Delta_v = k_t \cdot \Delta_t + k_d \cdot \Delta_d$$

La compression tuile et douille s'exprime en fonction de l'allongement de la vis

$$\Delta_t = L_t - (L_v + \Delta_v)$$

$$\Delta_d = L_d - (L_v + \Delta_v)$$

Par substitution,

$$F_v = k_v \cdot \Delta_v = k_t \cdot [L_t - (L_v + \Delta_v)] + k_d \cdot [L_d - (L_v + \Delta_v)]$$

l'on obtient à nouveau la valeur effective de l'allongement de la vis à température ambiante,

$$\Delta_v = \frac{k_t(L_t - L_v) + k_d(L_d - L_v)}{k_v + k_t + k_d}$$

et en tenant compte d'un échauffement

$$\Delta_v = \frac{k_t[L_t(1 + \alpha_t dT) - L_v(1 + \alpha_v dT)] + k_d[L_d(1 + \alpha_d dT) - L_v(1 + \alpha_v dT)]}{k_v + k_t + k_d}$$

$$\text{puis } \begin{cases} F_v = k_v \cdot \Delta_v \\ \Delta_t = L_t(1 + \alpha_t dT) - [L_v(1 + \alpha_v dT) + \Delta_v] \\ \Delta_d = L_d(1 + \alpha_d dT) - [L_v(1 + \alpha_v dT) + \Delta_v] \end{cases} \quad (\text{Équ. 2})$$

### 2.3 Cas III : $T_{cc} < T$

Ce cas est similaire au cas I, l'indice  $t$  pour la tuile étant remplacé par l'indice  $d$  de la douille.

$$F_v = k_v \cdot \Delta_v = k_d \cdot \Delta_d$$

$$\Delta_d = L_d - (L_v + \Delta_v)$$

$$F_v = k_v \cdot \Delta_v = k_d \cdot [L_d - (L_v + \Delta_v)]$$

$$\Delta_v = \frac{k_d(L_d - L_v)}{k_v + k_d}$$

Lors d'un échauffement de l'ensemble de  $dT$ , les pièces se dilatent d'un facteur  $(1 + \alpha dT)$ . L'allongement de la vis en fonction de la température s'écrit

$$\Delta_v = \frac{k_d[L_d(1 + \alpha_d dT) - L_v(1 + \alpha_v dT)]}{k_v + k_d} \quad \text{puis } \begin{cases} F_v = k_v \cdot \Delta_v \\ \Delta_d = \frac{k_v}{k_d} \cdot \Delta_v \\ \Delta_t = 0 \end{cases} \quad (\text{Équ. 3})$$

### 2.4 Seuils de température $T_c$ et $T_{cc}$

La valeur  $T_c$  définit la température à laquelle la dilatation thermique de la douille 'rattrappe' le jeu entre la tuile et la douille, c'est-à-dire lorsque la hauteur de la tuile comprimée est identique à celle de la douille dilatée encore libre :  $L_d = L_t - \Delta_t$ .

En substituant le facteur  $(1 + \alpha dT)$  pour l'allongement thermique

$$L_d(1 + \alpha_d dT_c) = L_t(1 + \alpha_t dT_c) - \Delta_t$$

puis après introduction de  $\Delta_t$  calculé selon (Équ. 1), dans l'expression précédente, l'on obtient

$$L_d(1 + \alpha_d dT_c) = L_t(1 + \alpha_t dT_c) - \frac{k_v}{k_t} \cdot \frac{k_t[L_t(1 + \alpha_t dT_c) - L_v(1 + \alpha_v dT_c)]}{k_v + k_t}$$

La mise en évidence de  $dT_c$  ainsi que la substitution  $u_c = k_v/k_t + 1$  et quelques transformations mènent à l'expression suivante

$$dT_c = \frac{L_t(1 - u_c) - L_v + u_c L_d}{L_t \alpha_t (u_c - 1) + L_v \alpha_v - u_c L_d \alpha_d} \quad \text{avec} \quad u_c = \frac{k_v}{k_t} + 1 \quad (\text{Équ. 4})$$

Par analogie, la valeur  $T_{cc}$  définit la température à laquelle la dilatation thermique de la tuile devient suffisamment faible par rapport à celle de douille comprimée par la vis, pour que se crée un jeu entre la tuile et la douille :  $L_d - \Delta_d = L_t$ .

Comme précédemment, la substitution du facteur  $(1 + \alpha dT)$  pour l'allongement thermique donne

$$L_d(1 + \alpha_d dT_{cc}) - \Delta_d = L_t(1 + \alpha_t dT_{cc})$$

L'équation de  $\Delta_d$  calculé selon (Équ. 3) dans l'expression précédente produit

$$L_d(1 + \alpha_d dT_{cc}) - \frac{k_v}{k_d} \cdot \frac{k_d[L_d(1 + \alpha_d dT_{cc}) - L_v(1 + \alpha_v dT_{cc})]}{k_v + k_d} = L_t(1 + \alpha_t dT_{cc})$$

La mise en évidence de  $dT_{cc}$  ainsi que la substitution  $u_{cc} = k_d/k_v + 1$  et quelques transformations permettent d'écrire

$$dT_{cc} = \frac{L_d(1 - u_{cc}) - L_v + u_{cc} L_t}{L_d \alpha_d (u_{cc} - 1) + L_v \alpha_v - u_{cc} L_t \alpha_t} \quad \text{avec} \quad u_{cc} = \frac{k_d}{k_v} + 1 \quad (\text{Équ. 5})$$

### 2.5 Calcul des rigidités

De façon très générale, la rigidité  $k$  est définie selon la loi linéaire simple comme rapport entre la force et le déplacement.

$$F = kx = \frac{E \cdot S}{l} \cdot \Delta l$$

Dans le cas de la vis, dont la longueur est composée de deux section distinctes, la même force agit dans les deux parties. La surface des sections étant différentes, les contraintes et donc les allongements sont différents.

$$F = \frac{E \cdot S_1}{l_1} \cdot \Delta l_1 = \frac{E \cdot S_2}{l_2} \cdot \Delta l_2 \quad \text{ou} \quad \Delta l_1 + \Delta l_2 = F \left( \frac{l_1}{E \cdot S_1} + \frac{l_2}{E \cdot S_2} \right)$$

La rigidité  $k_v$  de la vis se calcule par comparaison des termes

$$k_v = \frac{1}{\frac{l_1}{E \cdot S_1} + \frac{l_2}{E \cdot S_2}} \quad (\text{Équ. 6})$$

Les valeurs de longueur  $l$ , de surface  $S$  de la section et de module d'élasticité  $E$  s'obtiennent à l'aide du dessin de la vis (voir tableau 2) et des constantes physiques données dans le tableau 1.

La méthode décrite s'applique également au calcul de la rigidité de la douille  $k_d$  et de la tuile  $k_t$ , pour laquelle la surface comprimée est celle délimitée par la surface commune entre la plaquette et la 'poche' fraisée dans la tuile en forme de 'fer à cheval'.

## 2.6 Autres valeurs de référence

La limite élastique de compression du graphite constitue une valeur à ne dépasser en aucun cas. La particularité du graphite est l'augmentation de sa résistance avec la température. La force de serrage maximale admissible en respectant cette limite du graphite est calculée selon

$$F_{\text{vis max}} = \sigma_{\text{comp lim}} \cdot S_{\text{tuile}} \quad @ T_0$$

La force sur la vis est limitée par la limite proportionnelle d'élasticité du matériau et par la section résistante en traction, plus faible que la section résistante en cisaillement. En torsion, la vis présente une marge suffisante.

$$F_{\text{vis max}} = \sigma_{\text{lim 0.2}} \cdot S_{\text{vis}} \quad @ T_{\text{max}}$$

La précontrainte initiale est déterminée par l'angle de serrage, calculé simplement à partir du pas de la vis et de l'interférence initiale, et mesuré à partir d'une position angulaire qui correspond à un 'léger' serrage.

$$\beta = \frac{360^\circ}{p} \cdot (\Delta_l + \Delta_v) \quad @ T_0$$

## 3 Conclusions

Pour un serrage initial de  $\Delta_l + \Delta_v = 40 \mu\text{m}$ , la douille doit être usinée avec une différence de 45 à 55  $\mu\text{m}$  par rapport à la cote équivalente de la tuile. L'angle de serrage de la vis est de 12 °C et la force exercée par la vis par rapport à sa limite élastique est de 75 %. La validité de ces calculs se limite à la plage de température de 20 à 600 °C.

Pour les détails du calcul, voir le fichier *preload.m*, qui produit le graphe de précontrainte ci-après.

