

# Résistance au cisaillement d'une liaison monobloc CFC/Cu

M. Braccini<sup>a</sup>, G. Chevet<sup>b</sup>, M. Dupeux<sup>a</sup>, J. Schlosser<sup>b</sup>, E. Martin<sup>c</sup>

a. SIMaP Grenoble-INP/CNRS/UJF, BP 75, 38402 Saint Martin d'Hères

b. Association Euratom-CEA, CEA/DSM/IRFM, CEA Cadarache, 13018 Saint Paul-Lez-Durance

c. LCTS CNRS/Université Bordeaux 1, Bordeaux

## Résumé :

*La résistance au cisaillement de la liaison CFC/cuivre réalisée par procédé AMC est testée dans la configuration monobloc. Un dispositif spécifique a été développé pour permettre de tester la liaison suivant des secteurs de 53° afin d'évaluer la tenue de la liaison en fonction de son orientation par rapport aux directions principales du CFC, matériau orthotrope, et du flux thermique subi par la liaison lors de tests de fatigue. Les résultats obtenus sont comparés aux contraintes résiduelles lors de l'assemblage, calculées par éléments finis.*

## Abstract :

*The shear strength of a CFC/copper bonding is measured in the monoblock geometry obtained by AMC process. A specific shear testing set-up has been designed to test the bonding according to sector of 53° angle. The CFC material being orthotropic, this allows measuring shear resistance versus CFC orientations and also versus heat flux sustained by the bond during fatigue tests. The results are compared to residual stresses due to bonding process, calculated by finite element modeling.*

**Mots clefs :** monobloc, CFC, cisaillement, contraintes thermiques

## 1 Introduction

Certains composants face au plasma (CFP) de la future machine ITER (Cadarache, France) doivent être dimensionnés pour supporter des flux allant jusqu'à 20 MW/m<sup>2</sup> pendant 20s. C'est pourquoi on s'est orienté vers une géométrie « monobloc » (figure 1) où le composite carbone-carbone (CFC), matériau réfractaire, est traversé par un tube de refroidissement en cuivre durci (CuCrZr) [1]. La liaison CFC-cuivre est réalisée par le procédé développé par la société Plansee (Reutte, Autriche) l'« active metal casting » (AMC®) [2]. Lors de la fabrication des CFP et sous flux thermiques cycliques, des contraintes importantes se développent dans le composant, au niveau de la liaison CFC-Cu, du fait des dilatations différentielles entre le cuivre et le CFC [3]. Il apparaît important de caractériser cette liaison afin d'en comprendre les mécanismes d'endommagement.

Pour cela, on se propose de tester la liaison par cisaillement. L'essai mécanique a été spécialement développé pour la géométrie monobloc et permet de mesurer un niveau de contrainte à rupture. L'observation des faciès de rupture par microscopie optique et électronique permet de corréler cette contrainte à un chemin de rupture. L'essai de cisaillement a été choisi car il correspond au type de sollicitation auquel est soumis l'assemblage en service. En effet, les sollicitations thermomécaniques sont générées lors de la mise sous flux de l'assemblage par dilatation thermique différentielle de part et d'autre de la liaison. La géométrie monobloc apporte une problématique supplémentaire : la forme particulière de la liaison (circulaire) génère une anisotropie d'une part car le CFC est orthotrope et d'autre part parce que le flux à la liaison génère un champ de contraintes thermiques non uniforme. Alors qu'un essai de cisaillement consistant à pousser le tube de cuivre hors du bloc de CFC aurait donné un comportement global de la liaison, nous avons choisi d'étudier sa résistance par secteurs afin d'évaluer l'influence des effets précités.

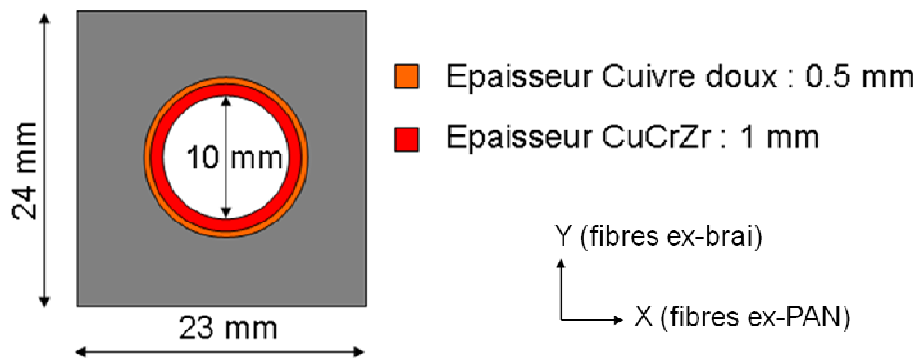


FIG. 1 – Dimensions d'un monobloc.

## 2 Cisaillement de la liaison par secteurs

Le CFC utilisé pour le monobloc est du NB31 réalisé par SPS-SNECMA (Le Haillan, France). Il s'agit d'un matériau orthotrope constitué de fibres ex-PAN dans le sens trame et de fibres ex-brai dans le sens chaîne, et il est aiguilleté dans la troisième direction [1,4]. La liaison CFC/cuivre est réalisée par le procédé AMC [2,5] qui consiste à couler le cuivre doux sur la surface de CFC, après dépôt de titane et de silicium. La surface de CFC a été préalablement traitée par laser si bien qu'en fin de processus on a des picots de cuivre incrustés dans le CFC. Dans la présente étude trois monoblocs ont été testés avec les références C14, C15 et C16 [6]. Ces trois monoblocs appartenaient à un même « tube » d'une maquette (figure 2) et ont subi des cycles de fatigue sous flux thermique différents (tableau 1). Ainsi, le monobloc C16 servira de référence puisqu'il n'a subi qu'une centaine de cycles à  $5 \text{ MW/m}^2$  alors que les monoblocs C14 et C15 ont subi des traitements beaucoup plus endommageant (flux de 10 à  $23 \text{ MW/m}^2$ ) pendant 1000 et 2000 cycles. Un cycle correspond à 10s d'exposition puis 10s de repos.



FIG. 2 – Maquette testée sous flux thermique cyclique et monoblocs prélevés.

Monobloc	$5 \text{ MW/m}^2$	$10 \text{ MW/m}^2$	$20 \text{ MW/m}^2$	$23 \text{ MW/m}^2$
C14	100 cycles	1 000 cycles	1 000 cycles	1 000 cycles
C15	100 cycles	1 000 cycles	1 000 cycles	1 000 cycles
C16	100 cycles	néant	néant	néant

TABLEAU 1 – Traitements sous flux thermique subis par les monoblocs étudiés.

La liaison circulaire entre le cuivre et le CFC balaie toutes les orientations du CFC et nous avons choisi de tester des secteurs le long du périmètre du tube de cuivre dont l'angle au centre est un compromis entre une taille d'échantillon suffisamment grande pour réaliser l'essai et en même temps pas trop importante pour rester dans une désorientation faible par rapport aux axes du CFC. Ainsi pour ces essais un angle de  $53^\circ$  a été choisi.

## 2.1 Dispositif expérimental et découpe des échantillons

Les monoblocs ont d'abord été découpés en tranches de 5 à 6 mm d'épaisseur. Puis la partie cuivre a été découpée en secteurs (figure 3) afin de collecter un maximum d'informations en fonction de la position. On notera que la découpe des secteurs avec un angle de  $53^\circ$  a généré des secteurs plus petits (angle  $37^\circ$ ) qui pourront être utilisés ultérieurement pour d'autres types d'essai.

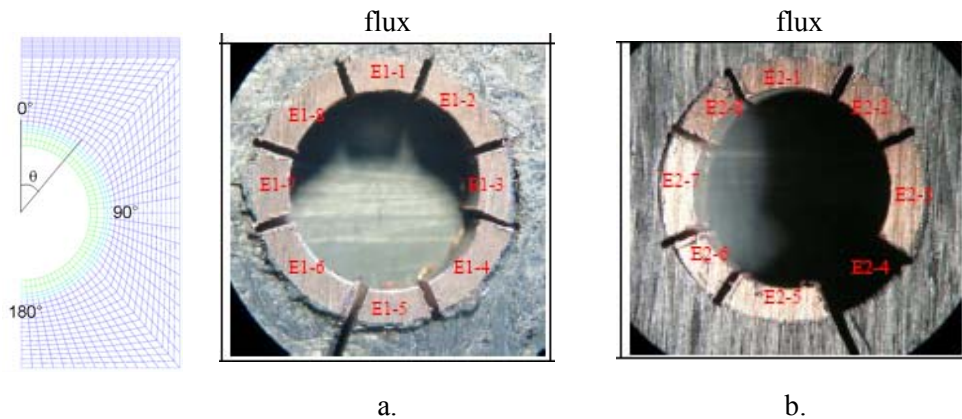


FIG. 3 – Découpe des tranches de monobloc en secteurs suivant deux répartitions a. et b.

Du fait de la géométrie spécifique des monoblocs et du choix de tester la liaison par secteurs, un dispositif spécial a été développé pour les essais de cisaillement. Ce dispositif, présenté sur la figure 4, est essentiellement composé d'une "matrice" dans laquelle est insérée la tranche de monobloc et d'un "poinçon" avec la forme d'un secteur (angle  $53^\circ$ ). Les dimensions du poinçon sont telles qu'il appuie sur le cuivre de structure et la liaison en cuivre et affleure le CFC, ceci afin de localiser le cisaillement à l'interface liaison/CFC. Ce poinçon est fixé sur un cylindre qui est guidé dans la matrice pour assurer l'alignement des pièces et un cisaillement pur. Le diamètre de ce cylindre est égal à celui de l'intérieur du tube de cuivre. Le poinçon est poussé par l'intermédiaire d'une bille ce qui permet de régler les problèmes de parallélisme de la machine de traction sur laquelle est fixé le montage (machine d'essai Zwick 1455). Tous les essais ont été réalisés avec une vitesse de déplacement constante, égale à 0,5 mm/min.

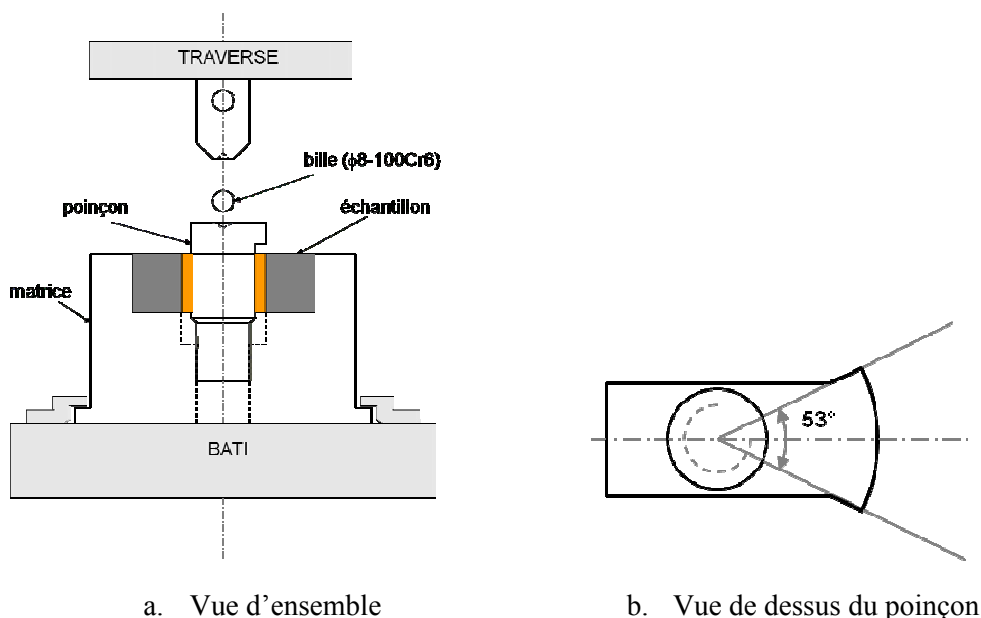


FIG. 4 – Dispositif de cisaillement.

## 2.2 Résultats

Pour chaque secteur testé, la force appliquée sur le poinçon en fonction du déplacement est enregistrée, et par la suite convertie en contrainte de cisaillement après calcul de la surface d'interface liaison/CFC. Pour la

plupart des échantillons on mesure une contrainte maximale qui correspond à la rupture de l'interface. A partir de ces mesures de contraintes maximales à rupture on peut essayer de dégager une tendance sur l'influence de l'orientation des secteurs et sur l'exposition des monoblocs au flux. Pour cela, nous classons les résultats tels que sur la figure 5 : les contraintes maximales sont classées par secteurs, le secteur le plus exposé au flux étant au centre (secteur 1). Les résultats sont ainsi reportés pour chaque bloc (couleur des barres) : pour le bloc n'ayant pratiquement subi aucun flux (bloc C16) et pour les blocs C14 et C15 ayant subi des flux thermiques jusqu'à 23 mW/m<sup>2</sup>. Les secteurs pour lesquels aucun résultat n'a été reporté sont les secteurs qui soit n'ont pas pu être testés car déjà décrochés lors de la préparation des échantillons, soit ceux pour lesquels la courbe de contrainte-déplacement n'est pas exploitable.

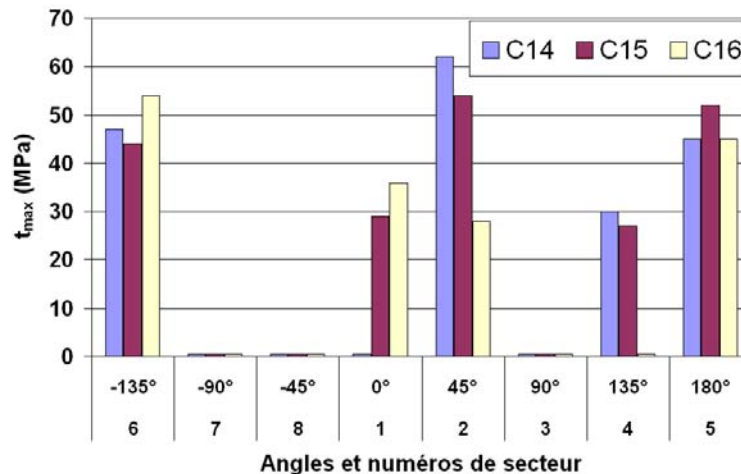
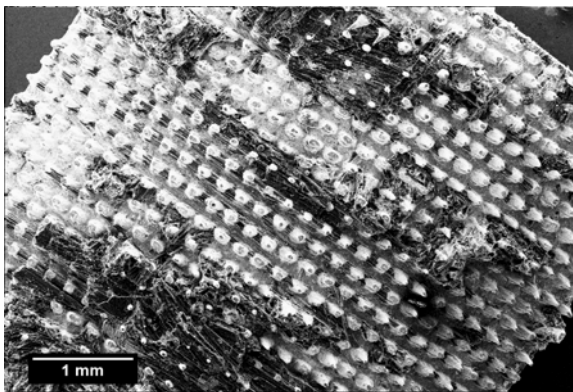
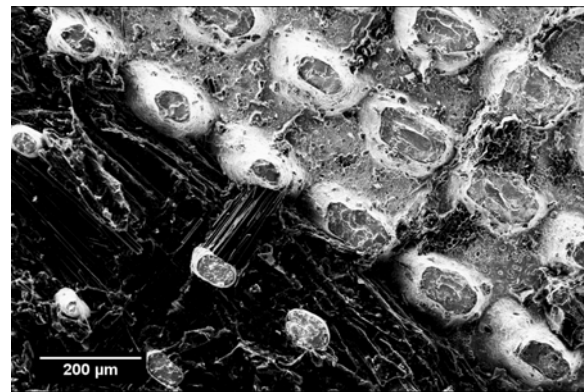


FIG. 5 – Contrainte maximale de cisaillement en fonction de la position du secteur.

Si on observe les faciès de rupture au microscope électronique à balayage (figure 6), on confirme que la rupture a bien eu lieu à l'interface cuivre/CFC : globalement les picots de cuivre sont déchaussés et on observe quelques résidus de CFC piégés entre les picots, en fonction de l'orientation des fibres vis-à-vis de l'interface. Ces faciès sont observés aussi bien sur les échantillons cisailés que sur ceux décrochés avant essai.



a. C16E2\_3 décroché pendant préparation



b. C16E2\_5 cisailé ( $\tau_{max} = 28$  MPa)

FIG. 6 – Faciès de rupture de secteur décroché seul (a.) et cisailé (b.).

### 3 Calculs des contraintes résiduelles

Un calcul 2D est réalisé avec le code de calcul Cast3M® sous l'hypothèse des déformations planes généralisées. Le comportement du CFC est linéaire élastique orthotrope, le cuivre doux et le cuivre chrome zirconium (CuCrZr) sont élasto-plastiques à écrouissage cinématique. La liaison entre le cuivre et le CFC est considérée comme parfaitement adhérente. Les contraintes résiduelles après assemblage sont évaluées à partir de refroidissement de 470°C à 20°C. Pour les entailles correspondant à la découpe en secteur, un matériau fictif est introduit : ce matériau a les propriétés du cuivre jusqu'à 21°C, puis, à 20°C, son module élastique devient très faible, simulant ainsi l'enlèvement de matière dû à la découpe.

A la fin de la fabrication, dans le monobloc sans découpe, les contraintes les plus élevées sont situées à 45° et à 135° pour les contraintes de cisaillement et à 90° pour les contraintes  $\sigma_{xx}$  (figure 7). Les valeurs obtenues dépassent les limites à rupture du CFC (Cisaillement xy : 15 MPa ; Traction x : 30 MPa). La découpe entraîne une relaxation de contraintes dans le CFC mais aussi l'apparition de singularités au niveau du coin des entailles, ce qui peut expliquer l'amorçage de fissures dans ces zones après découpe.

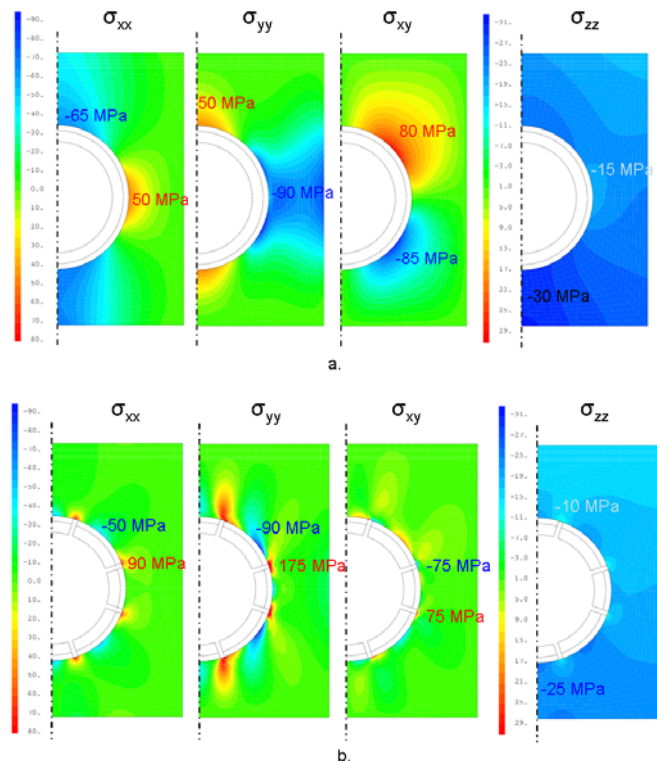


FIG. 7 – Répartition des contraintes résiduelles dans le CFC : a. sans découpe ; b. avec découpe.

## 4 Discussion

En ce qui concerne la résistance au cisaillement, on note qu'il n'y pas de variation logique de la résistance de la liaison en fonction du test de fatigue subi par le bloc : les niveaux de contrainte mesurés pour les blocs C14 et C15 ne sont pas particulièrement inférieurs à ceux mesurés pour le bloc C16. De plus, l'effet de l'orientation du secteur par rapport à la direction du flux thermique ne semble pas avoir d'influence non plus : on n'observe pas par exemple une croissance de la contrainte à rupture lorsque l'on s'éloigne de la surface en vis-à-vis du flux. La contrainte maximale de cisaillement moyenne reste de l'ordre de 40 MPa. Cette valeur bien que légèrement inférieure est comparable à celles obtenues avec le même type de matériaux mais suivant une géométrie tuile plate [7-8].

Par contre, les secteurs qui semblent les plus endommagés, c'est-à-dire ceux pour lesquels nous n'avons pu faire de mesure, semblent tous localisés au même endroit sur la liaison (angles -45° et ±90°). A partir des simulations numériques de la section 3 on peut associer ces zones aux zones de plus fortes contraintes résiduelles dues à l'élaboration des monoblocs. La faible adhérence des secteurs 3 et 7 peut ainsi être associée à une coïncidence de fortes contraintes en traction suivant x ( $\sigma_{xx}$ ) et d'une direction de faible résistance du CFC dans cette direction : ainsi les contraintes  $\sigma_{xx}$  calculées dans ces zones atteignent la limite à rupture en traction dans cette direction du CFC, soit 30 MPa [4]. Cependant ce type d'endommagement n'est peut être pas préjudiciable au fonctionnement du monobloc, car ce n'est pas suivant cette interface que s'effectue la plus grande dissipation de chaleur.

## References

- [1] Merola M., Wu C.H., Development of carbon materials and plasma facing components for ITER, Physica Scripta, T111, 152-156, 2004.

- [2] Merola M., Dänner W., Pick M., Eu R&D on divertor components, *Fusion Engineering and Design*, 75-79, 325-331, 2005
- [3] Chevet G., Schlosser J., Martin E., Herb V., Camus G., Escourbiac F., Initiation and propagation of damage in actively cooled CFC armoured high heat flux components in fusion machines, SOFT 2008.
- [4] Pintsuk G., Compan J., Linke J., Majerus P., Peacock A., Pitzer D., Rödiger M., Mechanical and thermo-physical characterization of the carbon fibre composite NB31, *Physica Scripta*, T128, 66-71, 2007
- [5] Schedler B., Huber T., Friedrich T., Eidenberger E., Kapp M., Scheu C., Pippin R., Clemens H., Characteristics of an optimized active metal cast joint between copper and C/C, *Physica Scripta*, T128, 200-203, 2007.
- [6] Missirlan M., Escourbiac F., Merola M., Durocher A., Bobin-Vastra I., Schedler B., Damage evolution under thermal fatigue of a vertical target full scale component for the ITER divertor, *Journal of Nuclear Materials*, 367-370, 1330-1336, 2007.
- [7] Schedler B., Friedrich T., Traxler H., Eidenberg E., Scheu C., Clemens H., Pippin R., Escourbiac F., Examination of C/C flat tile mock-ups with hypervapotron cooling after high heat flux testing, *Fusion Engineering and Design*, 82, 299-305, 2007.
- [8] Schedler B., Huber T., Eidenberg E., Scheu T., Pippin R., Clemens H., Methods to determine the joint strength of C/C to copper joints, *Fusion Engineering and Design*, 82(15-24), 1786-92, 2007.