



**HAL**  
open science

## Identification du module d'Young de matériaux réfractaires à base SiC

Emmanuel de Bilbao, Eric Blond, Christine Michel, Thierry Cutard, N. Schmitt, J. Poirier

### ► To cite this version:

Emmanuel de Bilbao, Eric Blond, Christine Michel, Thierry Cutard, N. Schmitt, et al.. Identification du module d'Young de matériaux réfractaires à base SiC. Matériaux 2010, Oct 2010, Nantes, France. pp.CD. hal-00600493

**HAL Id: hal-00600493**

**<https://hal.science/hal-00600493>**

Submitted on 15 Jun 2011

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Identification du module d'Young de matériaux réfractaires à base SiC

E. de Bilbao<sup>a</sup>, E. Blond<sup>a</sup>, C. Michel<sup>b</sup>, T. Cutard<sup>b</sup>, N. Schmitt<sup>c</sup>, J. Poirier<sup>d</sup>,

<sup>a</sup> Institut Prisme, 8 rue Léonard de Vinci, 45072, Orléans Cedex 2, [emmanuel.debilbao@univ-orleans.fr](mailto:emmanuel.debilbao@univ-orleans.fr)

<sup>b</sup> Institut CLEMENT ADER, École des Mines d'Albi-Carmaux, Campus Jarlard - 81013 Albi CT Cedex 09

<sup>c</sup> LMT-Cachan, 61 av Président Wilson, 94230 Cachan

<sup>d</sup> CEMHTI, 1d avenue de la recherche scientifique, 45071 Orléans Cedex 2

---

### RESUME:

Cette étude porte sur l'identification du module d'Young de matériaux réfractaires. Paramètre indispensable au modèle thermomécanique choisi, le module d'Young est identifié directement à partir d'un essai de flexion. De façon inhabituelle, il est proposé ici de déterminer le module à partir de la décharge pour éliminer certains effets perturbateurs issus du comportement non linéaire du matériau combinés avec ceux provenant des déformations de contact entre l'appareillage et l'éprouvette. Après avoir validé l'approche sur une éprouvette en aluminium, la détermination du module d'Young proposée est réalisée sur un réfractaire utilisé dans les fours hautes températures.

**MOTS-CLES :** Réfractaires – Comportement thermomécanique – Essai de flexion

---

### Introduction

Le principe des Unités de Valorisation Énergétique des Ordures Ménagères repose sur la récupération de la chaleur produite lors de la combustion des déchets ménagers. Au sein de ces installations, les réfractaires assurent le transfert de la chaleur vers les tubes métalliques renfermant le fluide caloporteur tout en les protégeant des fumées corrosives. En fonction des phases de chargement des ordures dans le four, le gradient thermique existant entre la face interne, chaude, et celle externe, froide, évolue dans le temps. Cette sollicitation thermique induit des contraintes mécaniques liées aussi aux caractéristiques morpho-dimensionnelles du revêtement et à la conception de sa fixation sur la paroi métallique. Placé dans un environnement à haute température, le matériau réfractaire subit également des sollicitations / transformations thermochimiques en réagissant avec les fumées d'incinération et en étant le siège d'un transport de réactifs au sein de sa porosité. Cet ensemble complexe de phénomènes thermochimiques va à la fois modifier le comportement thermomécanique du matériau et induire des déformations d'origine chimique s'ajoutant aux composantes thermomécaniques. Différents réfractaires, SiC à liaisons oxydes ou nitrures, utilisés dans les UVEOM sont étudiés dans le cadre du programme ANR Druide (étude de la Dégradation des Réfractaires Utilisés en Incinération des Déchets). L'étude de leurs propriétés thermomécaniques repose sur une importante base de données expérimentale regroupant, entre autres, des mesures US [1], des essais de traction à chaud [1] et des essais cycliques de flexion à chaud [2].

Le module d'Young est un des paramètres les plus importants dans les modèles proposés. Si les essais cités sont classiques et bien maîtrisés dans la plupart des cas, leur mise au point à haute température et éventuellement sous atmosphère contrôlée devient très délicate. Les contraintes de conception du montage imposées par les conditions de l'essai et le comportement spécifique des matériaux aux hautes températures rendent l'identification du module difficile [3]. De plus, les écarts avec les résultats obtenus par d'autres techniques [4] ont conduit à la présente proposition d'une nouvelle méthode d'exploitation des essais. Pour la partie non élastique, l'identification des coefficients de la loi de comportement choisie est obtenue par méthode inverse basée sur une analyse éléments finis.

### Matériau

Le matériau testé dans cette étude est un réfractaire produit par la société Caldeyrs sous le nom commercial SF60. Sa composition chimique et certaines caractéristiques sont indiquées dans le tableau 1.

Chemical analysis (%)	CaO	1,4
	Cement	5
	Si-Al phases	35
	SiC	60
	water	6,9
Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	2,58 ± 0,02	
Apparent porosity (%)	15,6 ± 0,4	

Tableau 1 - Caractéristiques de SF60 avant étuvage

### Essai

L'essai de flexion quatre points a été réalisé sur une machine universelle d'essais MTS 810 [5]. Un montage spécifique (Fig. 1) a été réalisé et installé dans un four à hautes températures (jusqu'à 1600 °C). Dans cet essai, l'échantillon est positionné entre quatre rouleaux en alumine de 12 mm de diamètre et résistant à la température. Les deux rouleaux supérieurs sont espacés de  $l=45$  mm et les deux inférieurs de  $L=125$  mm. Un capteur LVDT est monté sur le support des appuis inférieurs. Il permet de mesurer le déplacement vertical relatif du point situé au milieu de la face inférieure de l'éprouvette par rapport aux points de contact des rouleaux inférieurs. La flèche ainsi obtenue et l'effort appliqué sur le montage sont enregistrés durant l'essai.

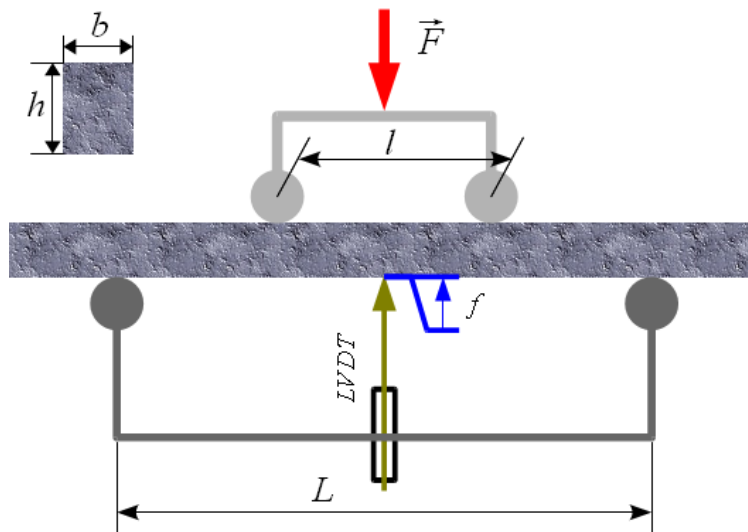


Figure 1- Essai de flexion 4 points

Le module d'élasticité  $E$  est alors déterminé par la théorie classique des poutres

La figure 2 montre le résultat d'un essai réalisé sur une éprouvette de SF60 de section  $40 \times 40$  mm<sup>2</sup> à 800 °C. La courbe en bleu correspond à un essai monotone ; celle en rouge à l'essai cyclique comportant 7 phases de chargement-déchargement avant la rupture.

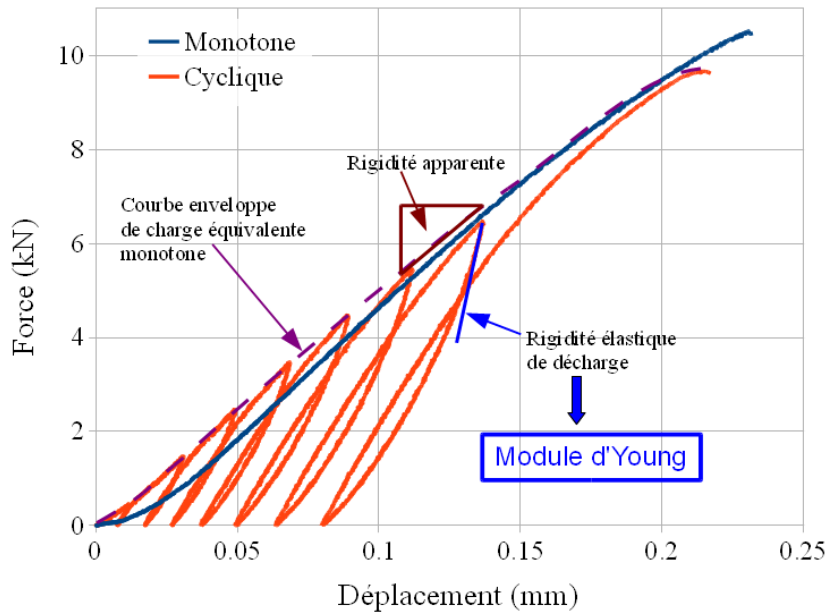


Figure 2 - Courbe force-déplacement d'un essai de flexion 4 points sur SF60 à 800°C

Dans l'essai monotone, on observe un pied de courbe non linéaire, dû probablement à un effet de montage, suivi d'une partie quasi linéaire jusqu'à la rupture. Ce comportement élastique-fragile est attendu pour ce type de matériau jusqu'à une température de l'ordre de 1200°C. On peut estimer le module d'Young apparent à environ 9 GPa, en considérant la pente  $\Delta F / \Delta f$  de la portion de courbe droite.

La courbe obtenue avec l'essai cyclique montre au cours des décharges la présence d'un déplacement permanent et un comportement hystérétique dus à un comportement inélastique inobservable au cours d'un essai monotone. La courbe enveloppe supérieure tracée sur cet essai est très proche de la réponse force-déplacement de l'essai monotone dans la zone éloignée du pied de la courbe. Ainsi, le module d'Young apparent calculé à partir de cette courbe enveloppe vaut 8 GPa, valeur proche de celle obtenue par l'essai monotone. Enfin, on peut noter que les droites médianes des courbes de déchargement-rechargement ont une pente presque constante durant les cycles conduisant à un module supérieur aux deux précédents.

### Essai de flexion réalisé sur un alliage d'aluminium.

Un essai réalisé à température ambiante sur une éprouvette en aluminium (AU4G), de taille comparable et dans une gamme d'effort identique à celle appliquée sur les essais sur le réfractaire, révèle, de façon atténuée, un comportement qui est inélastique pour ce matériau alors que celui-ci est élastique linéaire dans la plage des contraintes obtenues (Fig. 3).

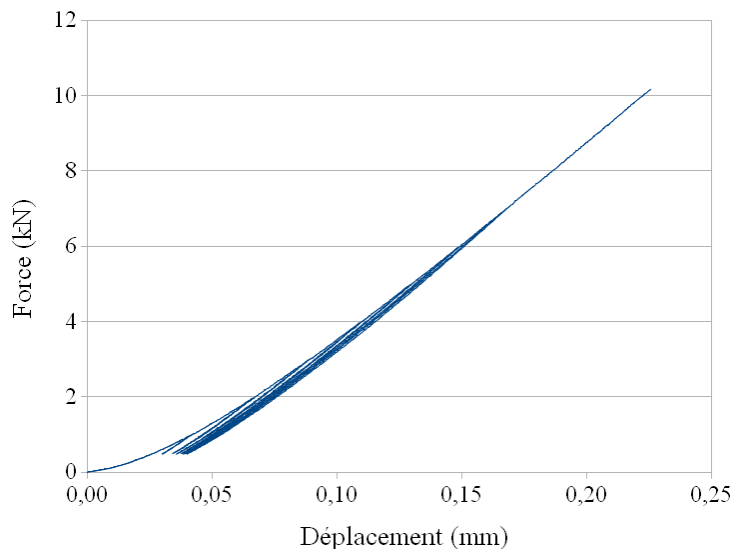


Figure 3 - Essai de flexion réalisé sur une éprouvette en alliage d'aluminium à température ambiante

Cette observation confirme que la non linéarité de la courbe réponse est liée au montage et à la mesure. En effet le déplacement mesuré englobe différentes sources d'erreur telles que la déformation du montage et l'écrasement de l'éprouvette sous les points d'appuis. Pour palier ces erreurs, une méthode alternative pour la détermination du module est proposée en exploitant la courbe de décharge plutôt que celle de la charge [6].

**Méthode de détermination du module d'élasticité.**

En appliquant la théorie des poutres élastiques, le module élastique est donné par :

$$E = \frac{\Delta F}{\Delta f} \frac{1}{8bh^3} (L-l)(2L^2 + 2Ll - l^2) \tag{1}$$

Où,  $\Delta F$  est la variation de force appliquée,  $\Delta f$  la variation de flèche mesurée, b et h la largeur et la hauteur dans la section de l'éprouvette. Le module obtenu dépend de la zone de la courbe sur laquelle on détermine la pente  $\frac{\Delta F}{\Delta f}$ .

En considérant que le déplacement mesuré englobe différentes sources d'erreur telles que la déformation du montage et l'écrasement de l'éprouvette sous les points d'appuis, il est proposé d'exploiter la courbe de décharge plutôt que celle de la charge. En effet, seul le retour élastique s'opère lors de la décharge et les déformations inélastiques des contacts ou de l'éprouvette elle-même sont naturellement absentes du déplacement mesuré à la décharge. Le déplacement total mesuré à la décharge ( $\Delta f$ ) n'est donc composé que de la déformation élastique du montage ( $\Delta f_m$ ), des contacts ( $\Delta f_{co}$ ) et de la flèche de l'éprouvette ( $\Delta f_e$ ) :

$$\Delta f = \Delta f_m + \Delta f_{co} + \Delta f_e \tag{2}$$

L'écrasement au droit d'un contact, d'après la théorie de Hertz, peut s'exprimer en fonction de l'effort normal de contact  $F_c$  [7] :

$$F_c = K_c f_{co}^n, \quad n > 1 \tag{3}$$

Où la raideur du contact  $K_c$  dépend des propriétés élastiques des matériaux en contact et de la géométrie.  $n$  est uniquement fonction de la géométrie du contact. En considérant que la relation (3) est aussi valable lors du relâchement du contact, elle peut être utilisée pour la décharge considérée ici. Il est alors aisé de démontrer que la forme de la dérivée du déplacement mesuré à la décharge en fonction de l'effort est :

$$\left( \frac{df}{dF} \right)_{dF < 0} = \frac{1}{K_m} + \frac{1}{K_e} + \frac{1}{nK_c^{1/n}} \left( \frac{1}{F/2} \right)^{1-\frac{1}{n}} \tag{4}$$

Où  $K_m$  et  $K_e$  sont les raideurs du montage et de l'éprouvette et F l'effort mesuré sur la traverse. Pour l'essai de flexion 4 points considéré, l'effort de contact représente la moitié de l'effort de traverse. Finalement, dans le cas d'un montage rigide ( $K_m$  très élevée), au début de la décharge (F élevée) :

$$\left( \frac{df}{dF} \right)_{dF < 0} \approx \frac{1}{K_e} \tag{5}$$

Le module d'Young peut ainsi être obtenu en prenant la pente au point correspondant au début de la décharge :

$$E = \left( \frac{dF}{df} \right)_{dF < 0} \cdot \frac{1}{8bh^3} (L-l)(2L^2 + 2Ll - l^2) \tag{6}$$

### **Application et résultats pour le module d'élasticité**

Un programme a été développé pour détecter, d'une part, les points de passage chargement-déchargement et calculer d'autre part les pentes aux courbes de décharge. Le programme a été utilisé sur les résultats d'essai de flexion réalisé sur l'aluminium. Les calculs ont permis d'obtenir un module évoluant de 43 GPa pour le premier cycle à des valeurs comprises entre 68 et 76 GPa pour les quatre derniers cycles. Ces valeurs doivent être comparées au module usuel de 70-75 GPa. On note ainsi une bonne corrélation notamment pour les valeurs élevées de l'effort.

Appliqué ensuite au réfractaire SF60 à 800 °C, le post-traitement des résultats d'essai donnent un module de l'ordre de 40 GPa pour les derniers cycles satisfaisant les hypothèses. Cette valeur peut être comparée à celle obtenue avec une mesure de module par ultrasons donnant 50 GPa. Comme avec l'essai de traction, on constate là encore un écart de l'ordre de 20%, entre la mesure par ultrasons et les résultats d'essais mécaniques [3].

### **Conclusions**

Les écarts habituellement observés dans la détermination du module d'Young des matériaux réfractaires entre les essais de flexion et les mesures par ultrasons (jusqu'à 30 %) sont ici expliqués par des effets perturbateurs liés au montage de flexion. Alors qu'il est habituel d'essayer d'améliorer ce dernier pour augmenter la précision du résultat, la méthode présentée ici propose un post-traitement prenant en compte les effets indésirables en déterminant le module d'Young à partir de la décharge et pour des valeurs d'effort assez élevées pour ne pas atténuer les déplacements liés à l'écrasement dans les zones de contact entre l'éprouvette et le montage. Après une validation de la méthode sur un matériau élastique (alliage d'aluminium), la méthode a été appliquée sur un béton réfractaire. Les résultats obtenus sont en meilleure concordance avec les mesures par ultrasons.

L'étude se poursuit maintenant par la prise en compte du comportement non élastique observé durant l'essai.

### **Références:**

- [1] Bahloul, O., *Evolutions en fonction de la température de propriétés élastiques de bétons réfractaires à base de carbure de silicium. Thèse de 3ème cycle, Université de Limoges, 2009.*
- [2] Michel, C., *Thèse de 3ème cycle, Mines d'Albi, soutenance prévue sept 2010.*
- [3] Schmitt, N., Berthaud, Y. and Poirier, J., *Tensile behaviour of magnesia carbon refractories. J. Euro. Ceram. Soc., 20, 2239-2248, 2000.*
- [4] Nazaret, Z., Marzagui, H. and Cutard, T., *Influence of the mechanical behaviour specificities of damaged refractory castables on the Young's modulus determination. J. Euro. Ceram. Soc., 26, 1429-1438, 2006.*
- [5] Robert, L. et al., *Use of 3-D Digital Image Correlation to Characterize the Mechanical Behaviour of a fiber Reinforced Refractory Castable. Exp. Mech., 47 [6] 761-773, 2007.*
- [6] de Bilbao, E. et al., *A new method to Determine the Young's Modulus of Refractory Materials. Interceram, 59 [1], 34-38, 2010.*
- [7] Aublin, M., *Systèmes mécaniques, 661p. Dunod : Paris, ISBN 2-10-049104-0, 2005*