

Effet de gaines en tungstène sur la mesure par thermocouples autour de 2000 K

Clemente J. PARGA^{1,2*}, Jean-François HAQUET¹, Christophe JOURNEAU¹

¹CEA, DEN, STRI/LMA, Cadarache, 13108 St Paul lez Durance

²University of Idaho, 1116 Science Center Drive, Idaho Falls, Idaho 83402, USA

* (auteur correspondant : clemente.parga@cea.fr)

Résumé - Cet article présente un modèle analytique en régime stationnaire de l'effet de la conductivité d'un thermocouple et de sa gaine sur la température au point de mesure lorsque ce thermocouple est installé dans un bloc de béton soumis à un important gradient de température. Ce modèle est comparé à des mesures effectuées à l'aide de thermocouples protégés par des gaines en tungstène d'épaisseurs différentes sur l'installation VULCANO du CEA Cadarache.

Nomenclature

e	épaisseur, m	<i>Symboles grecs</i>	
h	coefficient d'échange thermique, $W/(K.m^2)$	θ	température mesurée, K
l	largeur, m	Φ	puissance, W
m	périmètre, m	λ	conductivité thermique, $W/(K.m)$
R_c	résistance surfacique de contact, $K.m^2/W$	<i>Indices et exposants</i>	
r	rayon, m	Mo	molybdène
S	surface d'échange, m^2	Re	rhénium
T	température non perturbée, K	W	tungstène
u	gradient T/T , m^{-1}		

1. Introduction

La mise en place de thermocouples dans un matériau peu conducteur est un processus intrusif qui peut altérer localement le champ de températures et donc la mesure au niveau de la soudure chaude du thermocouple [1]. Pour effectuer des mesures à hautes températures, il est souvent nécessaire de protéger les capteurs par des gaines épaisses en matériaux réfractaires. Lorsque pour mesurer la température dans un creuset à hautes température, une partie du capteur se situe dans solide soumis à un très fort gradient de température, la conductivité relativement élevée du thermocouple et de sa gaine par rapport à celle du creuset entraîne des pertes thermiques locales et une altération de la température au point de mesure. Il est important de pouvoir estimer l'erreur de mesure due à cet effet afin de pouvoir estimer l'incertitude associée et si possible corriger la mesure.

Après une description du dispositif expérimental VULCANO, on donne une expression analytique de la perturbation de la température. Cette expression est comparée à des températures mesurées à l'aide de deux thermocouples situés a priori sur une isotherme et ayant des gainages de 5 et 10 mm de diamètre extérieur.

2. Dispositif expérimental

Lors d'un accident grave de centrale nucléaire, le cœur peut fondre, former un bain dénommé *corium*, s'écouler hors de la cuve et interagir avec le béton du puits de cuve. L'objectif du programme expérimental VULCANO-ICB est d'étudier expérimentalement cette interaction [2][2, [3][3]. Pour ce faire, un bain de corium fondu est versé dans un creuset

hémicylindrique en béton. Ce creuset est instrumenté d'une centaine de thermocouples de type K, destinés à suivre la progression du front d'ablation et de 10 thermocouples tungstène-rhénium de type C (Figure 1).



Figure 1 : Thermocouples instrumentant la section d'essai (photographiés avant de couler le béton)

Les thermocouples de types C, fabriqués par la société ThermoEst, sont constitués de deux fils en tungstène (W) allié avec respectivement 5 et 26% masse de rhénium (Re). Ces fils sont isolés électriquement avec de la poudre de hafnie. Un gainage en molybdène (Mo) de diamètre externe 1.6 mm recouvre les deux fils (Figure 2A). Cette protection est insuffisante vu le caractère agressif du bain fondu et il s'est avéré nécessaire d'utiliser un surgainage. Nous avons déterminé expérimentalement que des tubes (non débouchants) de tungstène de 5 à 10 mm de diamètre externe (Figure 2B et C) permettent une tenue des thermocouples pendant 1 à 2 heures dans un bain d'oxydes de l'ordre de 2000 – 2500 K. La Figure 2D présente une vue en coupe du thermocouple et de son gainage.

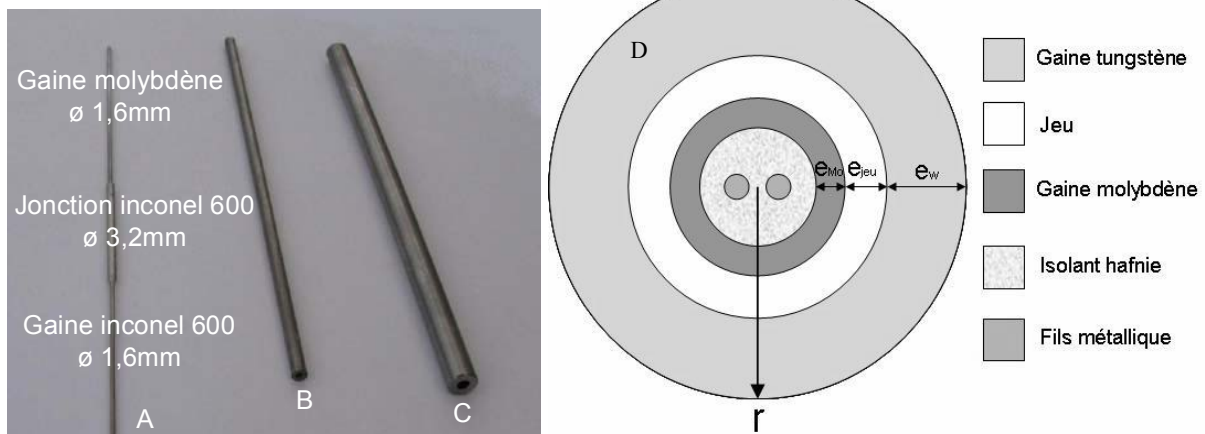


Figure 2 : Thermocouple de type C

« A : thermocouple gainé molybdène - B : tubes de tungstène $\varnothing_{ext}=5\text{ mm}$, $\varnothing_{int}=2,5\text{ mm}$ - C : tubes tungstène $\varnothing_{ext}=10\text{ mm}$, $\varnothing_{int}=4\text{ mm}$ - D : schéma en coupe »

3. Modélisation

Afin de modéliser plus simplement les échanges thermiques entre le thermocouple et le milieu ambiant, nous avons transformé la géométrie de la Figure 2D en une géométrie axisymétrique en assimilant les deux fils du thermocouple en un seul fil de

diamètre égal à $\sqrt{2}$ fois le diamètre d'un fil (0.3 mm). La conductivité de ce fil équivalent est prise à la moyenne arithmétique de celle des deux fils. La Figure 3 présente les conductivités des matériaux considérés et met en évidence le grand écart de conductivité entre le thermocouple et son environnement (la conductivité du béton est de l'ordre de 2-3 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

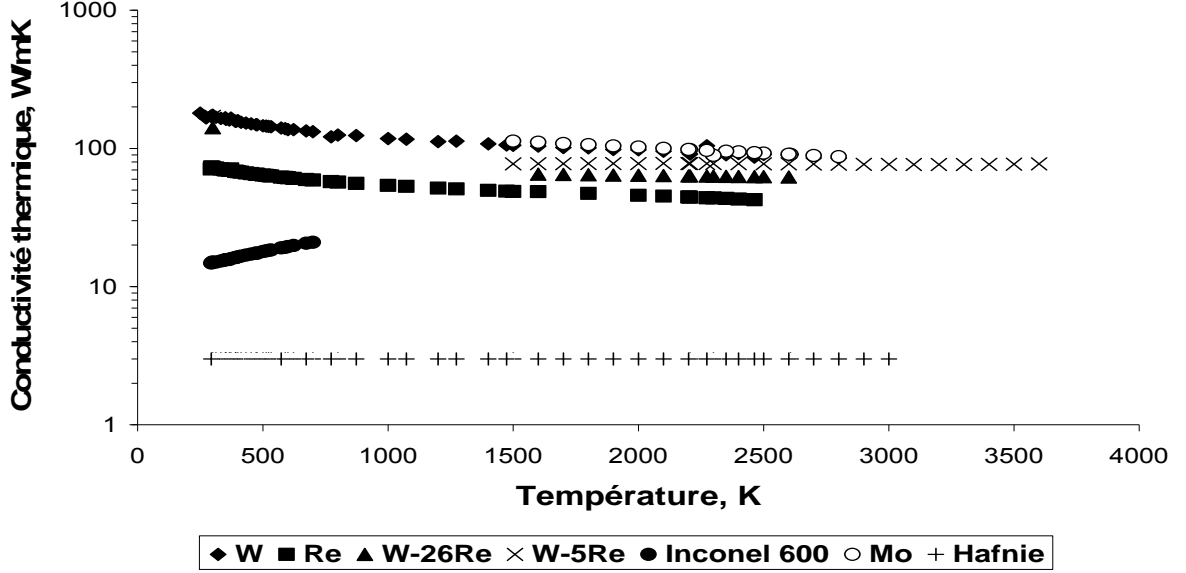


Figure 3 : Conductivité des différents matériaux considérés.

On peut estimer la conductivité axiale du thermocouple en considérant que les résistances thermiques du fil, de l'isolant, de la gaine, du jeu et de la sur-gaine sont en parallèle. On trouve :

$$\lambda_{eq} = \left\{ \frac{2\lambda_{fil}r_{fil}^2 + \lambda_{fil} \left[(r - (e_{Mo} + e_{jeu} + e_w))^2 - 2r_{fil}^2 \right] + \lambda_{Mo} \left[(r - (e_{jeu} + e_w))^2 - (r - (e_{Mo} + e_{jeu} + e_w))^2 \right] + \lambda_{air} \left[(r - e_w)^2 - (r - (e_{jeu} + e_w))^2 \right] + \lambda_w \left[r^2 - (r - e_w)^2 \right]}{r^2} \right\} \quad (1)$$

Pour les échanges thermiques radiaux, on va considérer que les résistances thermiques sont en série. Le coefficient de transfert thermique radial s'écrit alors:

$$h = \left\{ \frac{r}{\lambda_{fil}} \ln \left(\frac{r - (e_{Mo} + e_{jeu} + e_w)}{\sqrt{2}r_{fil}} \right) + \frac{r}{\lambda_{Mo}} \ln \left(\frac{r - (e_{jeu} + e_w)}{r - (e_{Mo} + e_{jeu} + e_w)} \right) + \frac{r}{\lambda_{air}} \ln \left(\frac{r - e_w}{r - (e_{jeu} + e_w)} \right) + \frac{r}{\lambda_w} \ln \left(\frac{r}{r - e_w} \right) \right\}^{-1} \quad (2)$$

On trouve des valeurs du coefficient de transfert radial de l'ordre de 400 $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ pour les surgainages fins et de 100 $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ pour les surgainages épais. La conductivité axiale équivalente est de l'ordre de 90 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour les deux configurations.

3.1. Thermocouple dans un gradient de température en régime permanent

On suppose que le thermocouple est plongé dans un solide soumis à un gradient de température supposé constant. On pose :

$$T(x) = T(0)(1-ux) \quad (3)$$

La température du thermocouple $\theta(x)$ du thermocouple à l'abscisse x vérifie :

$$\lambda \left\{ S \frac{d\theta}{dx} \Big|_{x+dx} - S \frac{d\theta}{dx} \Big|_x \right\} - 2\pi r h (\theta(x) - T(x)) dx = 0 \quad (4)$$

Soit :

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - \frac{2h}{\lambda r}(\theta(x) - T(x)) = 0 \quad (5)$$

La solution de cette équation différentielle est de la forme :

$$\theta(x) = A \operatorname{sh} mx + B \operatorname{ch} mx + T(0)(1 - ux) \quad \text{avec} \quad m^2 = \frac{2h}{\lambda r} \quad (6)$$

3.2. Thermocouple dans un milieu isotherme

On considère maintenant la partie du thermocouple baignant dans l'air dont la température T_{ext} est considérée constante. La solution de l'équation différentielle (5) s'écrit alors :

$$\theta(x) = A'e^{-m'x} + B'e^{m'x} + T_{ext} \quad \text{avec} \quad m'^2 = \frac{2h'}{\lambda r} \quad (7)$$

En supposant de longueur infinie la partie du thermocouple dans l'air, le terme B' est nul car la température $\theta(\infty)$ doit rester finie.

3.3. Thermocouple partiellement dans un solide et dans l'air

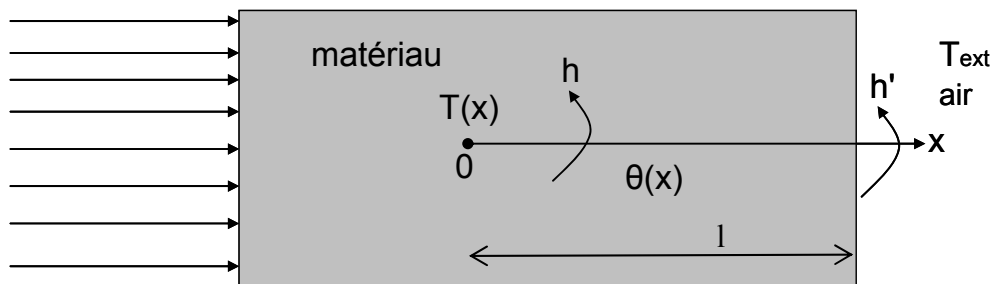


Figure 4 : Thermocouple dans un solide

Dans le cas de la [Figure 4](#), le thermocouple est en contact du solide pour $0 \leq x \leq l$ et est dans l'air pour $x \geq l$. Le matériau du thermocouple ne changeant pas à l'interface solide-fluide, la continuité des flux se traduit par la continuité des gradients de température en $x = l$.

$$\left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{l^+} = -m' A' e^{-m'x} = -m' [\theta(l) - T_{ext}] \quad (8)$$

$$\left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{l^-} = Am \operatorname{ch} ml + Bm \operatorname{sh} ml - uT(0) \quad (9)$$

Donc :

$$\frac{-m'}{m} (A \operatorname{sh} ml + B \operatorname{ch} ml + T(0)[1 - ul] - T_{ext}) = A \operatorname{ch} ml + B \operatorname{sh} ml + \frac{uT(0)}{m} \quad (10)$$

La conservation de la puissance thermique au niveau de la soudure chaude s'exprime par :

$$\phi(0) = h_{equi}(T(0) - \theta(0)) = \lambda S(uT(0) - Am) \quad (11)$$

Le coefficient de transfert thermique h_{equi} à la soudure chaude prend en compte la convergence des lignes de flux vers le capteur et l'effet de résistance surfacique de contact R_c (valant de 10^{-3} à 10^{-4} K.m².W⁻¹) :

$$\frac{1}{h_{equi}} = \frac{1}{4r\lambda_{b\acute{e}ton}} + \frac{R_c}{\pi r^2} \quad (12)$$

Dans ces conditions, l'erreur de mesure est égale à la constante d'intégration $-B$ et s'écrit :

$$T(0) - \theta(0) = -B = \frac{\lambda S}{h_{equi}} (uT(0) - Am) \quad (13)$$

Après quelques manipulations algébriques, on trouve comme expression de la constante A :

$$A = \frac{T(0)u \left[\frac{1}{m} + R sh ml + \sqrt{\frac{h'}{h}} R ch ml \right] - [T(0)(1-ul) - T_{ext}] \sqrt{\frac{h'}{h}}}{ch ml + mR sh ml + \sqrt{\frac{h'}{h}} (sh ml + mR ch ml)} \text{ avec } R = \frac{\lambda S}{h_{equi}} \quad (14)$$

4. Application

Lors de l'essai VULCANO VB-ES-U3 représentatif de l'interaction d'un bain de corium tout oxyde avec un béton (mortier de silice), des mesures de température (Figure 5) ont été effectuées à intervalle de temps régulier en coupant le chauffage par induction (simulant la puissance résiduelle du réacteur) afin d'éliminer tout risque de perturbation électromagnétique.

Les thermocouples TCW1, TCW3, TCW6, TCW7 et TCW8 sont implantés dans le mortier et la soudure chaude de chacun de ces capteurs demeure dans ce matériau durant toute la durée de l'interaction. Dans ces conditions, les courbes de température associées à ces thermocouples représentent l'échauffement du mortier.

Par contre, la soudure chaude des thermocouples TCW4 et TCW5 est localisée dans la croûte de corium qui se forme au tout début de l'interaction entre le bain et la paroi du fond du creuset, les températures mesurées étant sous le liquidus. Dans ces conditions, les courbes de température associées à ces thermocouples représentent le refroidissement de cette croûte (pendant l'ablation du béton). L'écart de température (valant 75 K en moyenne) entre ces deux capteurs est dû à la différence d'épaisseur du sur-gainage.

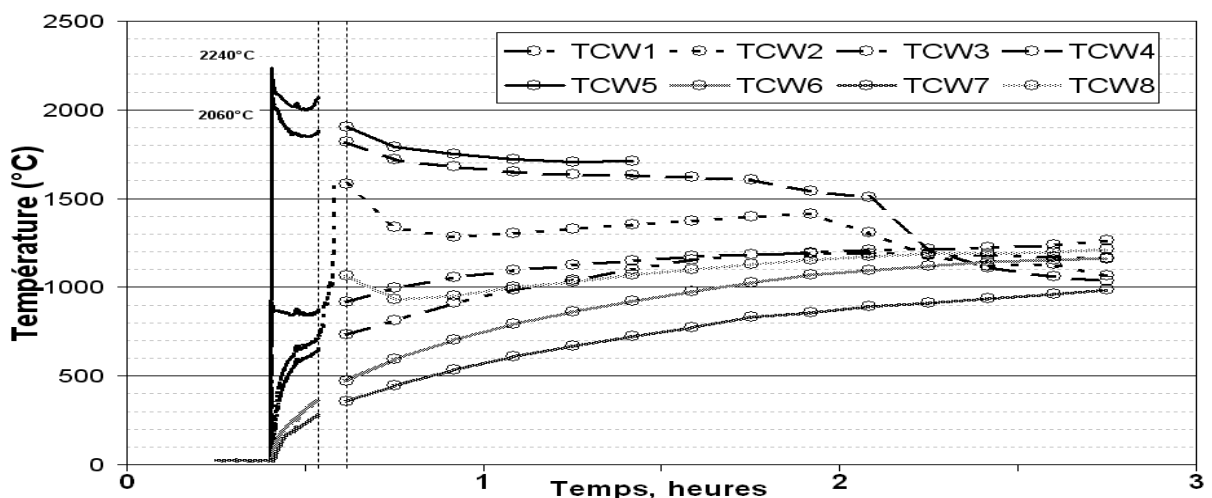


Figure 5 : Mesures de température lors d'un essai VULCANO (échelle de temps arbitraire)

Comme les conductivités du mortier et des croûtes de corium sont relativement proches (2-3 et 2.45 W/(m.K), respectivement), on peut considérer que les soudures chaudes des TCW4 et TCW5 sont dans le mortier et leur appliquer le modèle développé au paragraphe 3.

Pour les capteurs TCW4 et TCW5, si on ne considère pas le jeu entre le molybdène et le sur-gainage, ou si on considère la totalité du jeu à froid (1.2 mm et 0.45 mm respectivement), on trouve un écart entre les températures mesurées $\theta(0)$ de l'ordre de -50 et +50K respectivement. En considérant un jeu thermique égal à 15% du jeu géométrique à froid, on estime (Tableau 1) des températures $T(0)$ quasi identiques à partir des mesures des deux capteurs. La perturbation $[T(0)-\theta(0)]$ due au sur-gainage de 5 mm est de l'ordre de 35 K, alors qu'elle est de l'ordre de 100 K pour le gainage de 10 mm.

Mesure n°	Capteur gainé 10 mm (TCW4)		Capteur gainé 5 mm (TCW5)	
	$\theta(0)$	$T(0)$	$\theta(0)$	$T(0)$
1	2092	2195	2181	2217
2	1994	2100	2066	2101
3	1956	2053	2023	2055
4	1925	2023	1995	2028
5	1912	2012	1982	2014
6	1904	2006	1986	2020

Tableau 1 : Mesures de température $\theta(0)$ et estimation de la température non perturbée $T(0)$

5. Conclusions

Nous avons proposé et validé sur des mesures avec des gainages de dimension différentes un modèle exprimant la perturbation qu'apporte la structure métallique d'un thermocouple par rapport à un milieu peu conducteur. Une sous-estimation de l'ordre de 35 K a été déterminée pour le capteur le plus fin.

Il nous reste maintenant à inclure la présence d'un liquide supposé isotherme à proximité de la soudure chaude afin d'adapter ce modèle à toutes nos configurations expérimentales.

Références

- [1] J.P. Bardon, Mesure de température et de flux de chaleur par des méthodes par contact, In : S. Benet (ed), *Métrologie Thermique et Techniques Inverses*, Presses Univ. Perpignan (2001).
- [2] C. Journeau, S. Malaval, Comportement thermique du béton d'une centrale nucléaire lors d'un accident grave, Congrès Français de Thermique, SFT2006, Ile de Ré, 16-19 mai 2006.
- [3] C. Journeau, J.M. Bonnet, E. Boccaccio, P. Piluso, J. Moneris, M. Breton, G. Fritz, T. Sevón, P. H. Pankakoski, S. Holmström, J. Virta, European Experiments on 2D Corium-Concrete Interaction: HECLA and VULCANO, *Nuclear Technology*, 170(2010), 189-200.
- [4] C. Journeau, P. Piluso, L. Ferry, J.-F. Haquet, Separate Effect Tests with Artificial Concretes to Determine the Causes of Ablation Anisotropy, Séminaire MCCI OCDE, Cadarache, 15-17 November 2010.

Remerciements

L'aide de J.P. Bardon et B. Garnier pour l'obtention d'un modèle analytique initial a été une des clés de la réussite de cette étude.