



energie atomique • energies alternatives

Besoins et défis des mesures intrusives des très hautes températures pour l'étude de bains convectifs



Christophe Journeau, Clemente Parga,
Nathalie Cassiaut-Louis, Lionel Ferry,
Pascal Fouquart, José Monerris,
Abbaye Guiry, Pascal Piluso

CADARACHE

Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives
Centre de Cadarache
Laboratoire d'essais pour la Maîtrise des Accidents graves

Journée SFT du 29.6.2010

Outline



energie atomique • energies alternatives

- **Contexte**
- **Présentation des essais VULCANO**
Exemples de Mesures de Températures
- **Gainages des Thermocouples et effets sur la mesure**
- **Conclusions**



Contexte



energie atomique • énergies alternatives

- **Même à de très hautes températures (2000-3000 K), la réalisation d'essais exige des mesures de températures (relativement) précises.**

- **Capteurs de Température :**
Non-intrusifs

- > **Pyrometrie**
- > **Thermographie**

Capteurs à température \pm ambiante

Mesure seulement la température de surface

Nécessite des informations sur l'émissivité

**Les données d'émissivité à Hautes temp. sont rares
(surtout pour des mélanges)**

Intrusifs

- > **Thermocouples**
- > **Sondes UltraSonores de Températures, etc.**

Compatibilité avec des bains réactifs, durée de vie, coûts....

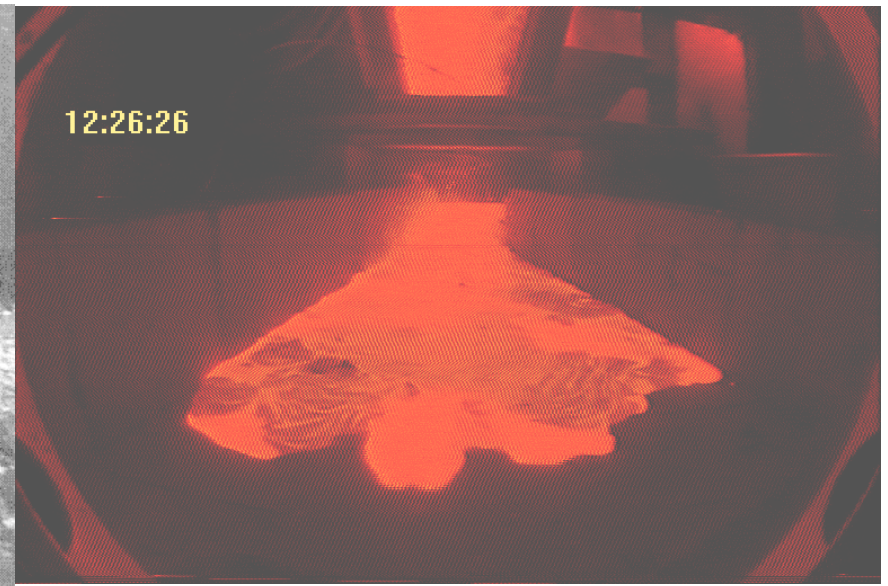
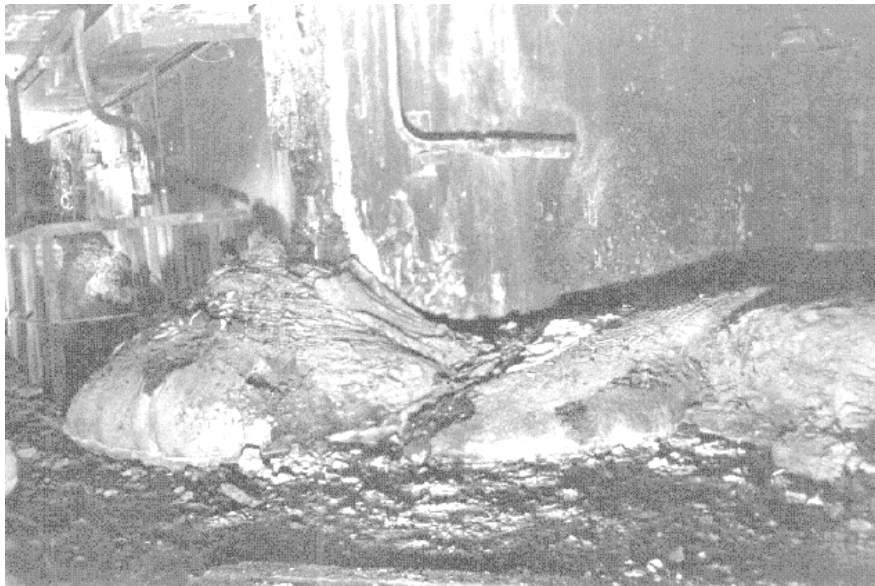


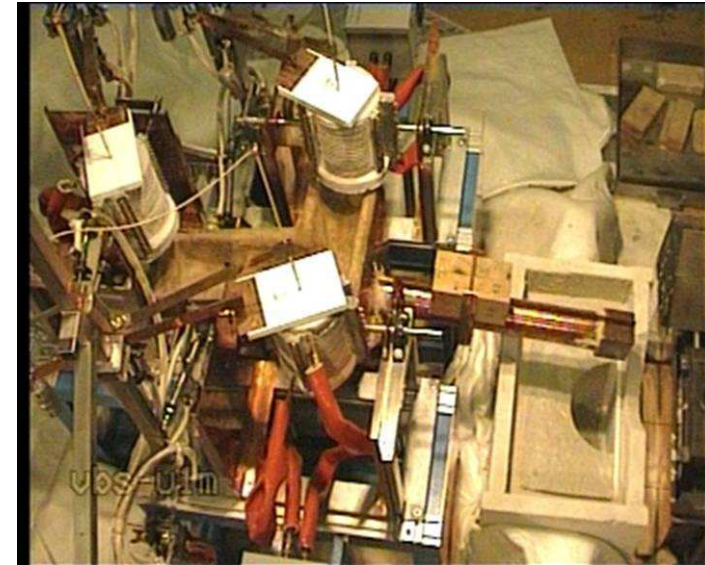
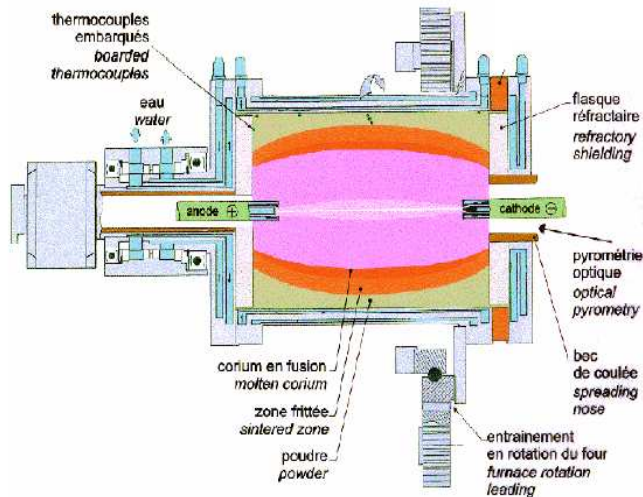
Notre Application : Essais corium pour la Sûreté Nucléaire



energie atomique • energies alternatives

- Dans le cas hypothétique ($< 10^{-5}$ /réacteur.an) d'un accident grave de réacteur nucléaire, on appelle *corium* le mélange issu de la fusion du cœur et de son interaction avec les matériaux environnants.
- C'est un mélange à hautes températures (2000-3000 K) principalement constitué d'oxydes (UO_2 , ZrO_2 , béton fondu,...) et de métaux (Zr, acier).
- L'installation VULCANO est dédiée à des recherches expérimentales avec du corium prototypique ou des simulants à haute température (U remplacé par Hf).





- **Four à arc plasma pour le corium oxyde**
4-8 litres coulés
15-20 L fondus
- **Trois fours inductifs de 1 litre pour la fusion et la surchauffe de l'acier.**



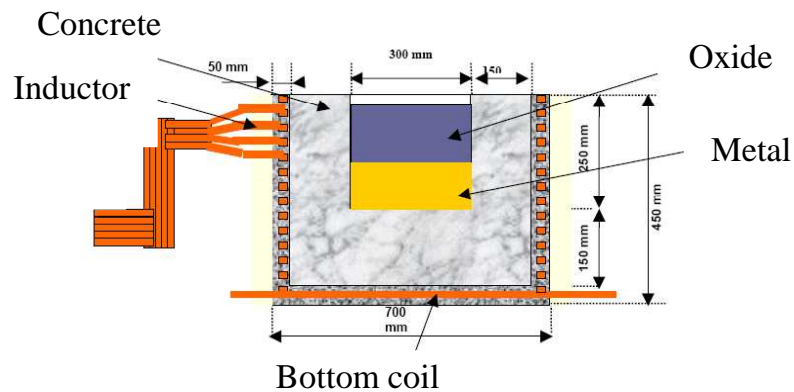
*Four Plasma utilisé seul lors d'essais avec un corium tout oxyde.
Pour les essais avec corium oxyde + métal, on utilise tous les fours.*

L'installation VULCANO 2. Les sections d'essai



energie atomique • énergies alternatives

- **Section d'essais en béton avec plus de 100 TC pour suivre l'ablation**
- **Cavité hémicylindrique (+ paroi en céramique réfractaire)**
- **Chauffage inductif du bain**
- **Spires non connectée pour concentrer le champ magnétique**
- **>90% de la chaleur générée dans la couche oxyde (après stratification éventuelle)**



Matrice d'essais avec corium oxyde



energie atomique • energies alternatives

Test	VB-U4	VB-U5	VB-U6	VB-U7
Concrete	G <i>Limestone</i>	F <i>Silica</i>	F <i>Silica</i>	EPR <i>Ferro-siliceous</i>
Corium composition	40% UO ₂ , 43% ZrO ₂ , 7% SiO ₂ , 2% CaO, 8% Fe ₂ O ₃	54% UO ₂ , 38% ZrO ₂ , 4% SiO ₂ , 1% CaO, 3% Fe ₂ O ₃	56% UO ₂ , 36% ZrO ₂ , 4% SiO ₂ , 1% CaO, 2% FeO.	56% UO ₂ , 36% ZrO ₂ , 4% SiO ₂ , 1% CaO, 2% FeO.
Estimated Initial oxide mass	45 kg	28 kg	31 kg	54 kg
Oxides Initial Temperature	~2200°C	~2400°C	~2400°C	~2200°C
Test Duration	2 hours	2 h 30	2 hours	2h 40



Matrice d'essais oxyde + métal



energie atomique • énergies alternatives

Test	VBS-U1	VBS-U2	VBS-U3	VBS-U4
Concrete	G <i>Limestone</i>	F <i>Silica</i>	F <i>Silica</i>	F <i>Silica</i>
Estimated Initial oxide mass	37 kg	18 kg	36 kg	? Lighter oxide
Estimated Initial metal mass	14 kg	16 kg + 7 kg	15 kg	15 kg?
Oxides Initial Temperature	~2000°C	~2000°C	~2000°C	~1800°C ?
Metal Initial Temperature	~1700°C	~1710°C	~1790°C	~1790°C ?
Test Duration	4 hours	3 h 45	4 hours	2 hours ?
Average Injected Power Estimation	~30 kW	~18 kW	~20 kW	~20 kW



Besoins de mesures de température



energie atomique • energies alternatives

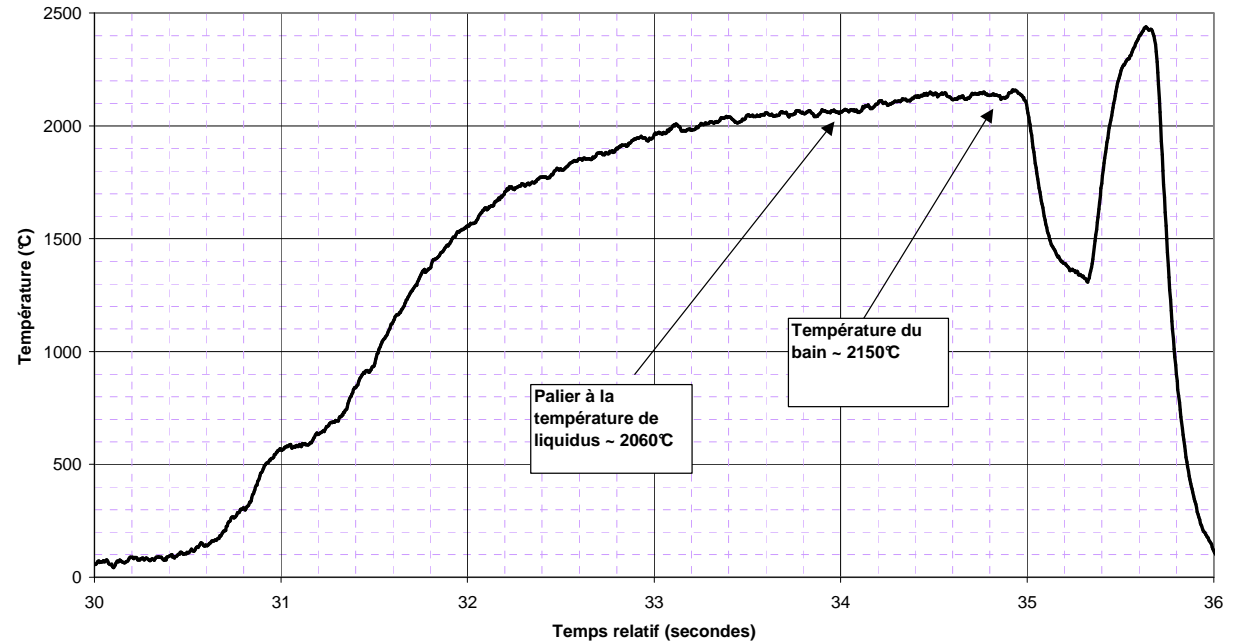
- **Il ne s'agit pas d'essais dans un four isotherme !**
- **Bain soumis à une source de chaleur interne**
 - Chauffage par induction simulant la Puissance radiologique résiduelle
- **Différences de température bain-interface de quelques dizaines de K**
- **Très fort gradient de température dans la croûte supérieure**
 - Présence de cavités réduisant encore la température de surface
- **Intervalle Solidus-Liquidus**
 - Température liée à la fraction solide
 - Bains $\text{UO}_2\text{-ZrO}_2$, intervalle de solidification de l'ordre de 50 K
- **Besoin de mesures intrusives**
 - Température interface – Température Bain
 - Différence de température entre couches dans configurations stratifiées oxydes métal
 - En pratique, on a plus besoin de mesures précises en différentiel qu'en absolu (sauf pour relations avec diagramme de phase).



Sondes intrusives W-3Re – soudure froide dans céramique

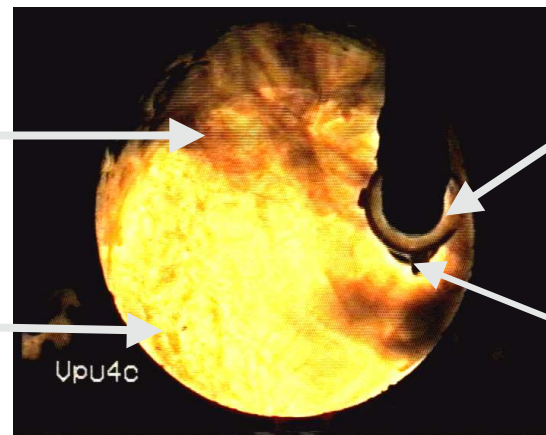


Température du bain au début de la rampe de décroissance de puissance ~ 2150°C
Perche de mesure plongée dans le bain



fumes

Melt pool surface

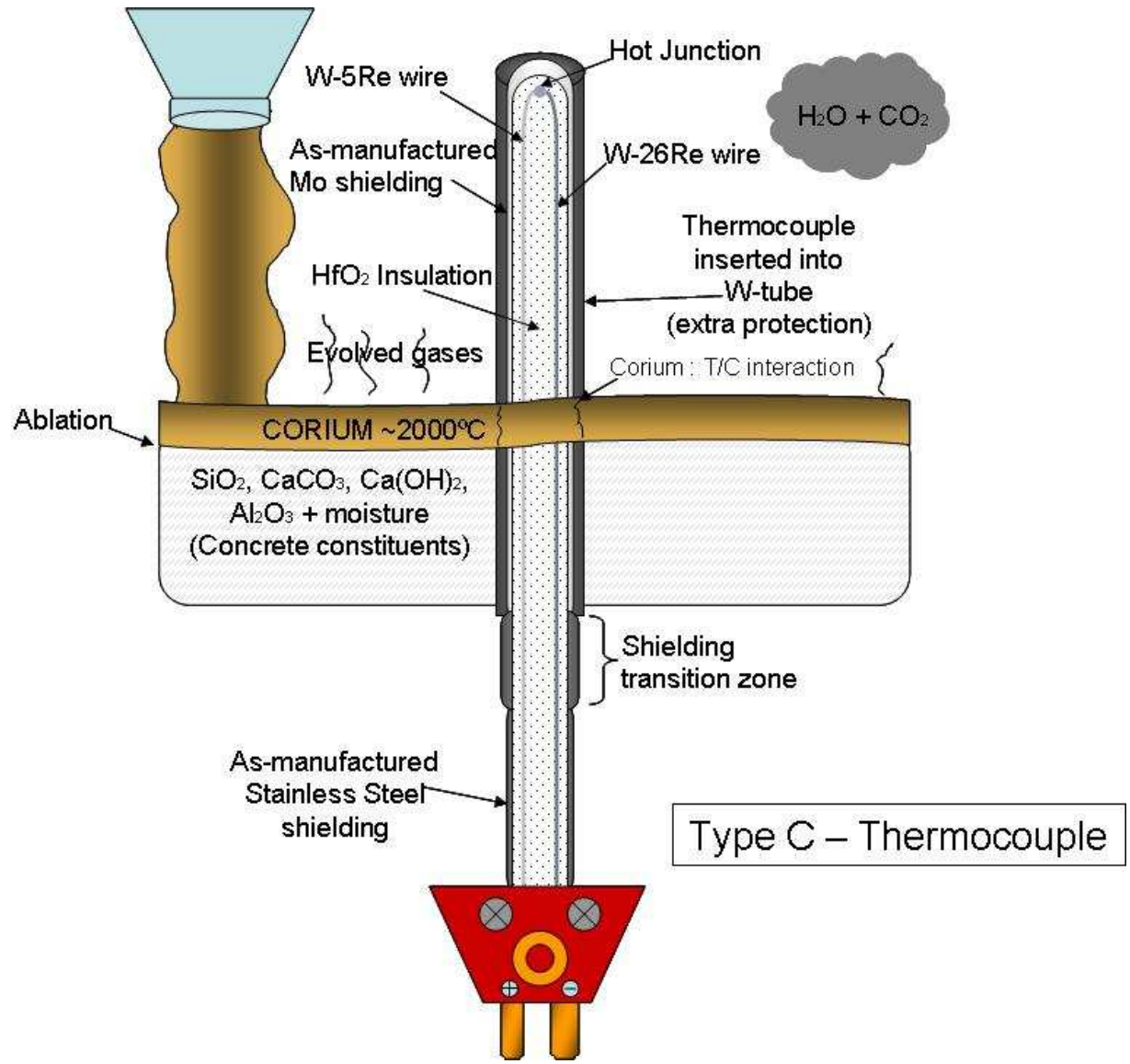


Collected sample

Probe



Schéma TC W

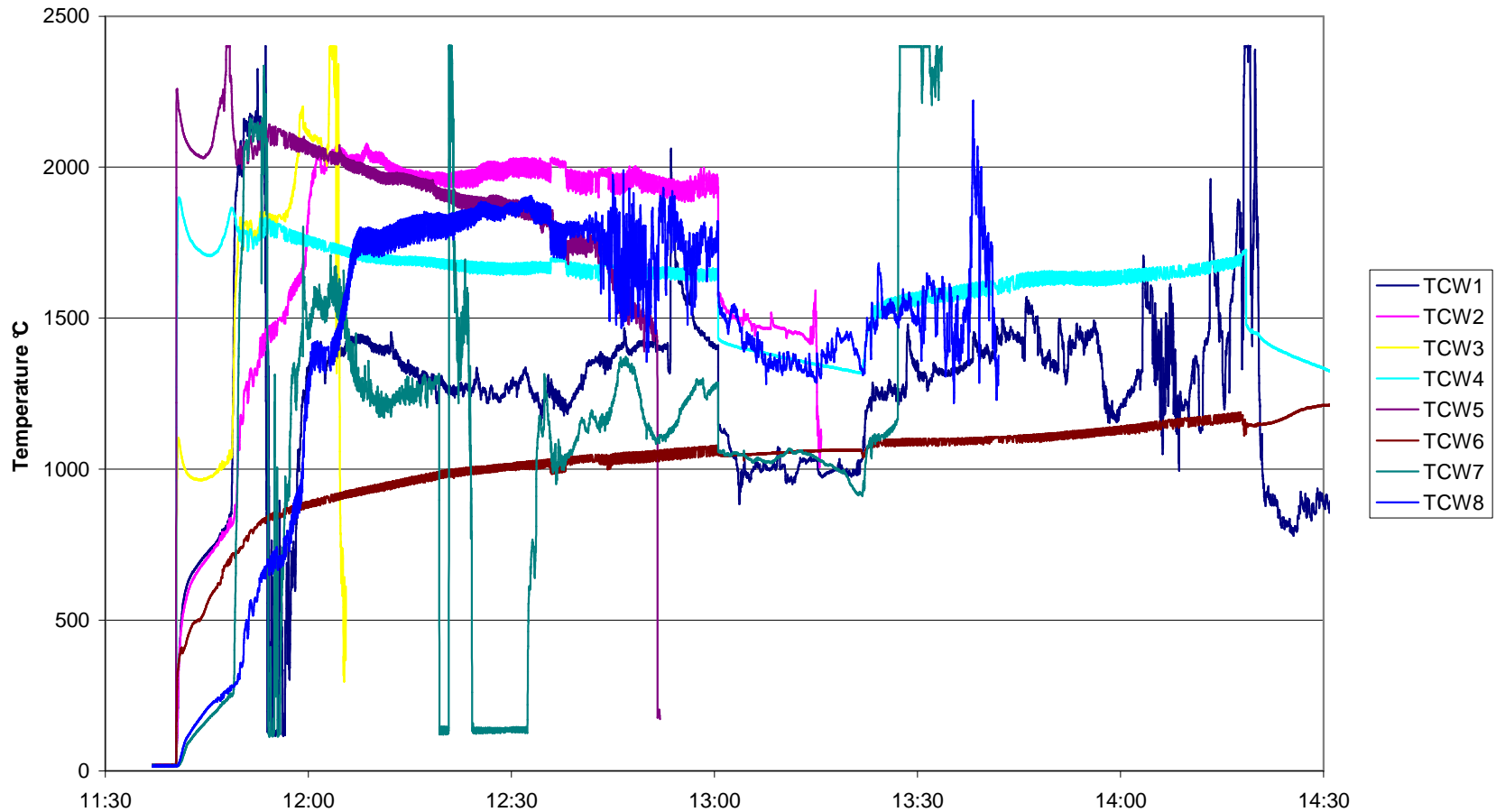


Mesures TC W lors d'essais avec corium tout oxyde



energie atomique • energies alternatives

VB-U7



CADARACHE

Christophe Journeau et al.

Journée SFT du 29.6.2010

Mesures TC W VBS-U1 Oxyde + acier

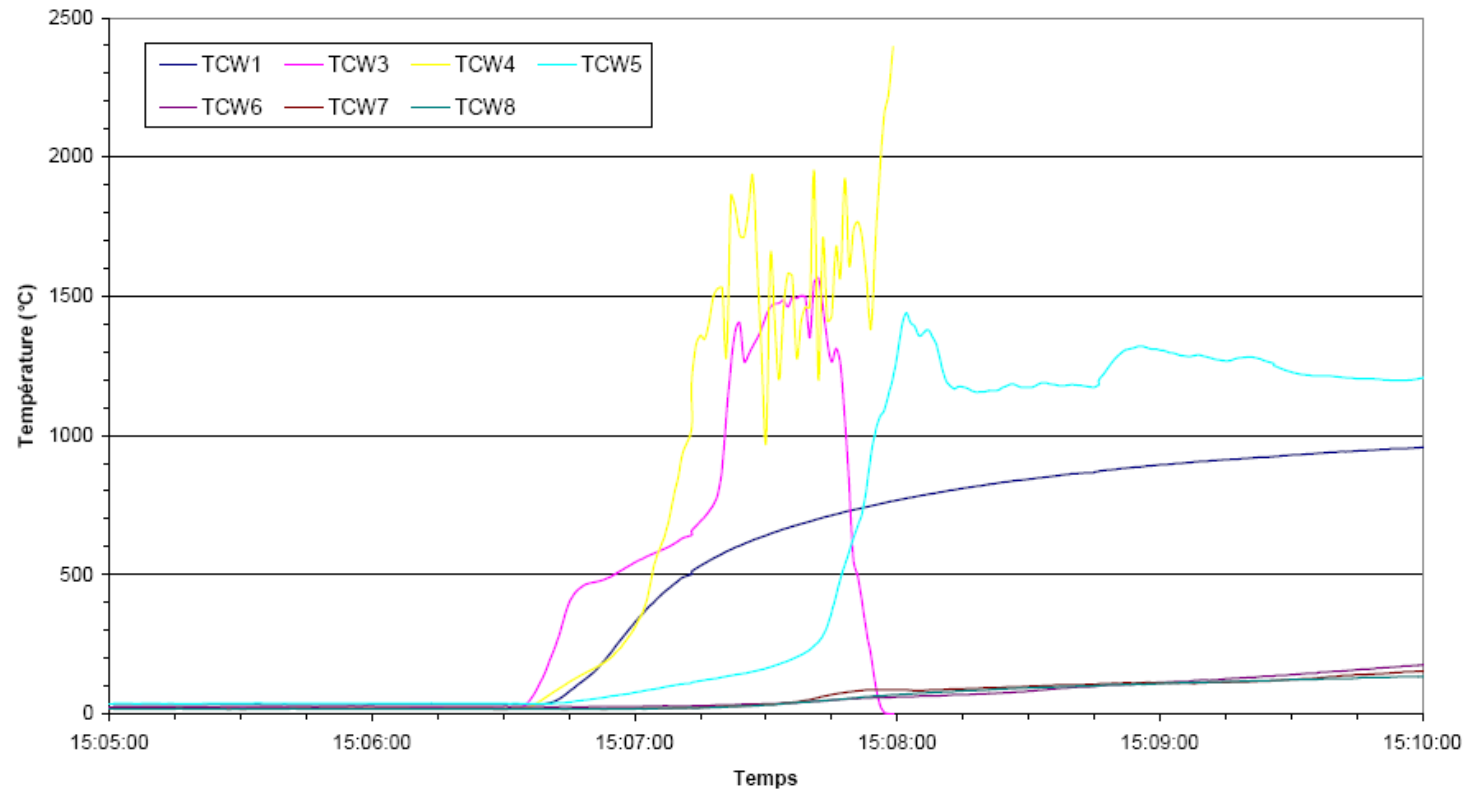


Figure 6 : Evolution de la température mesurée par les thermocouples W (zoom)

- **Perte rapide du signal (attaque par l'acier fondu)**
- **Compatible avec visées pyros**
1800°C surface bain
1930°C Température coulée (au bec)



Mesures TC W VBS-U3 Oxyde + Métal

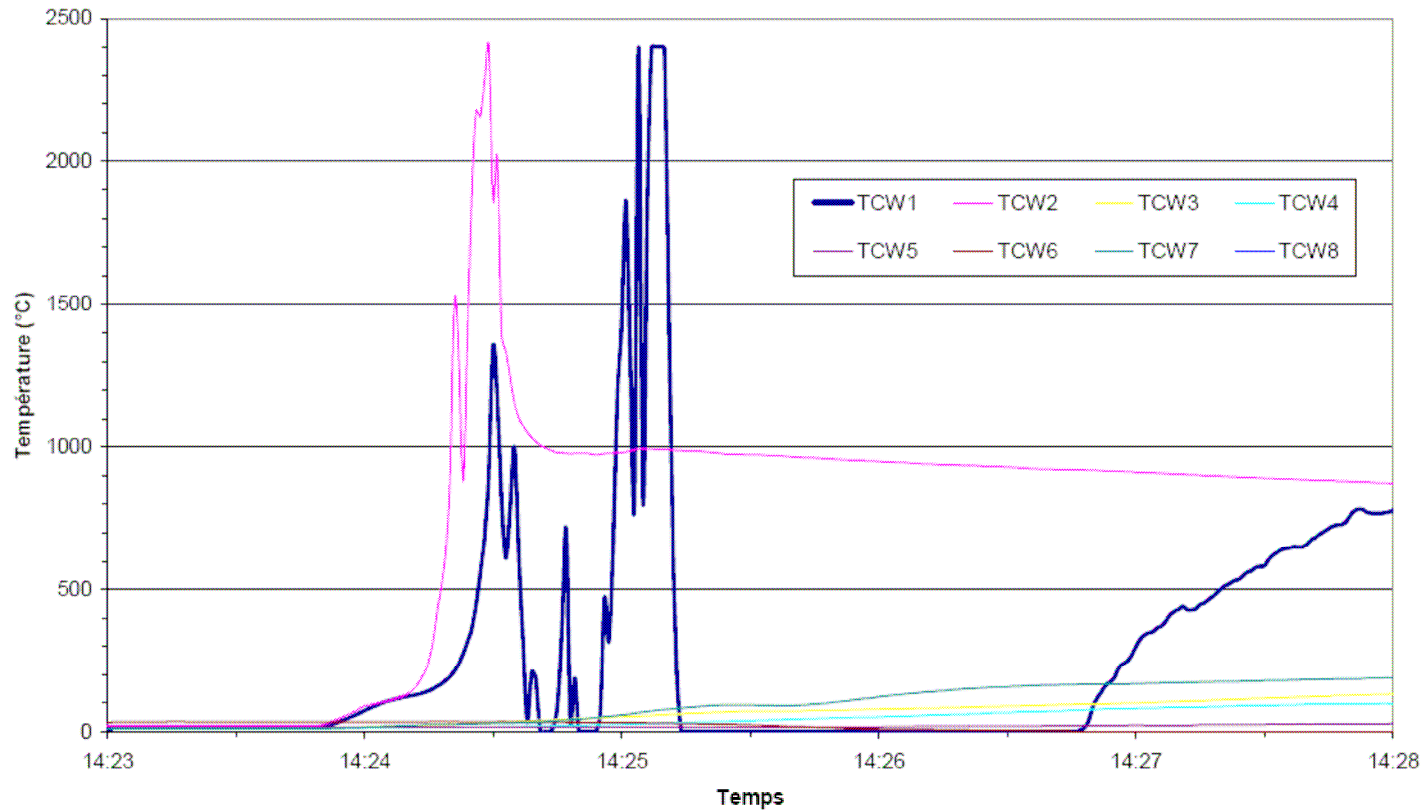


Figure 3 : Evolution de la température mesurée par les thermocouples W (zoom)



Mesure de la température de surface du bain lors d'éruptions

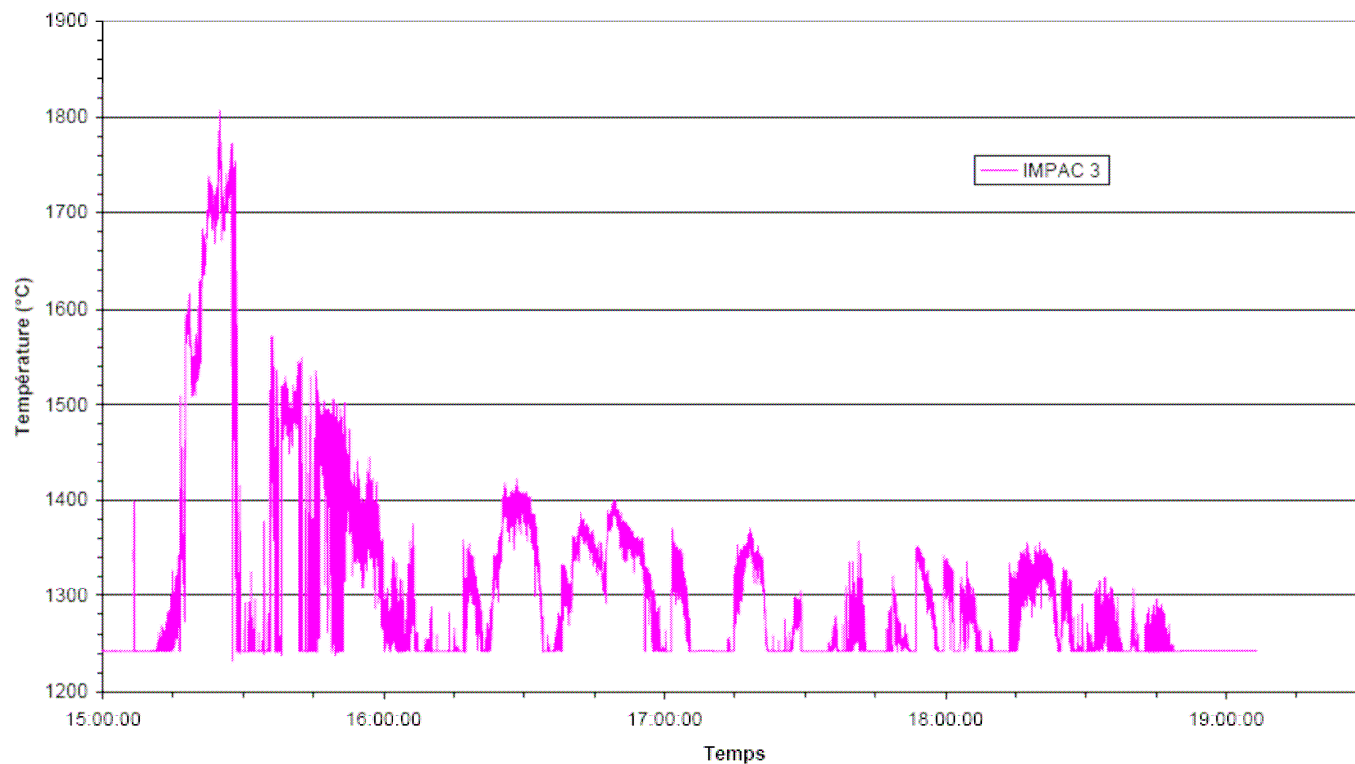


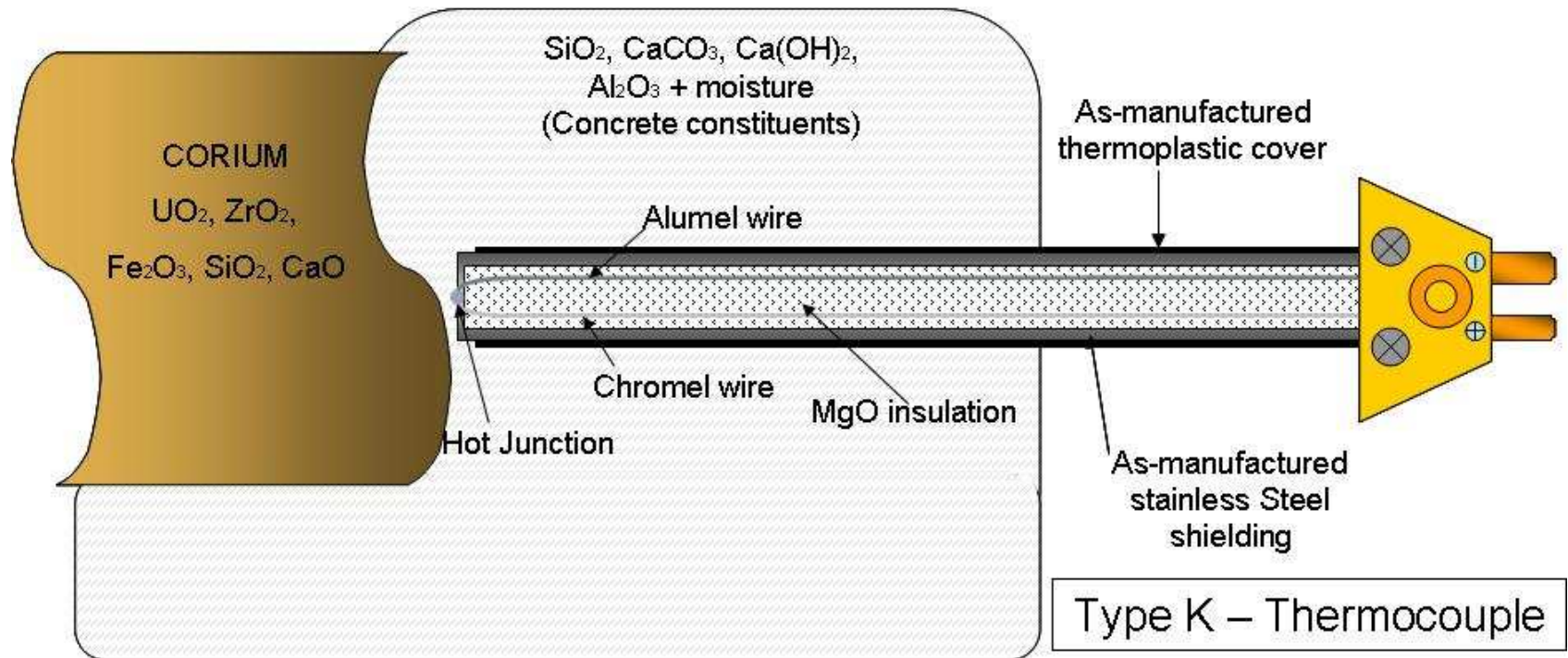
Figure 4 : Evolution de la température de surface du bain mesurée à l'aide de l'IMPAC 3



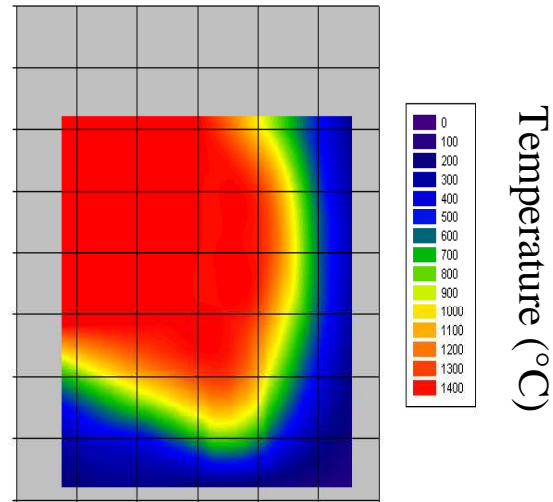
Schéma des TC K



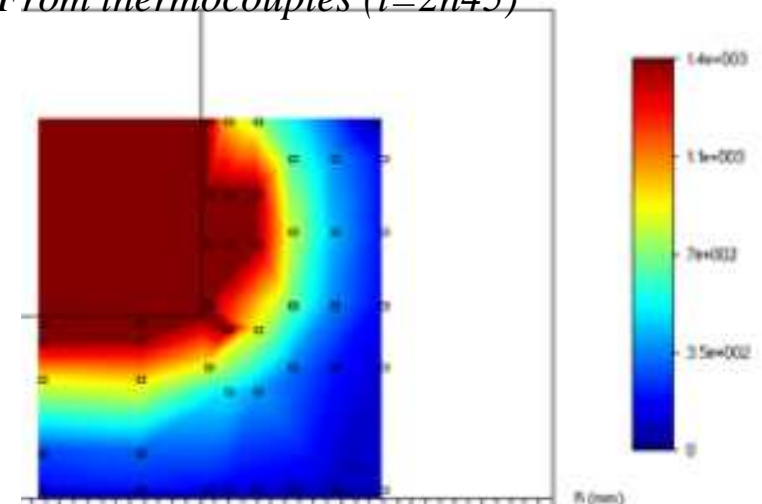
energie atomique • énergies alternatives



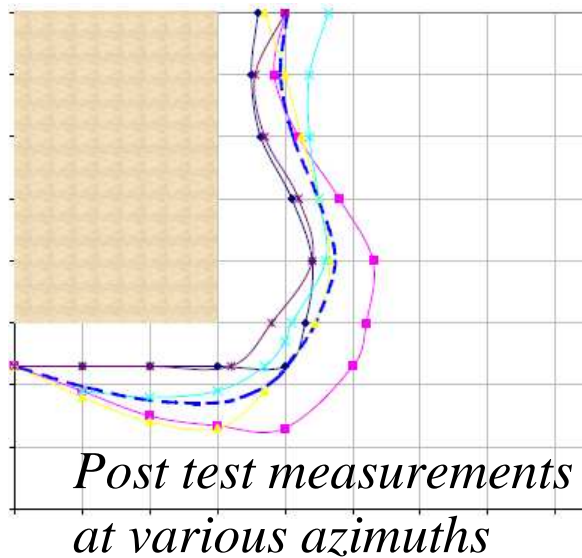
From thermocouples (t=4h)



From thermocouples (t=2h45)



- For all three tests, the ablation was roughly isotropic
- A large dissymetry in azimuths has been observed in VBS-U3



Défis résiduels TC W dans corium oxyde

- **Perturbation électromagnétiques dès que TCs dénudés à 2 potentiels différents.**

Mesures lors coupures brèves chauffage

- **L'isolant est en fait un semi-conducteur à HT**

- **Perturbation de la mesure par le TC**

TC "épais" surgainage 3 mm

=> 300 K de moins que TC "fins" surgainage 1.25 mm

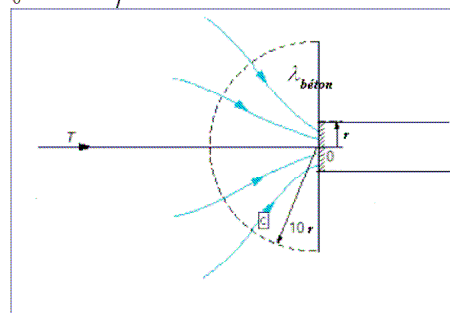
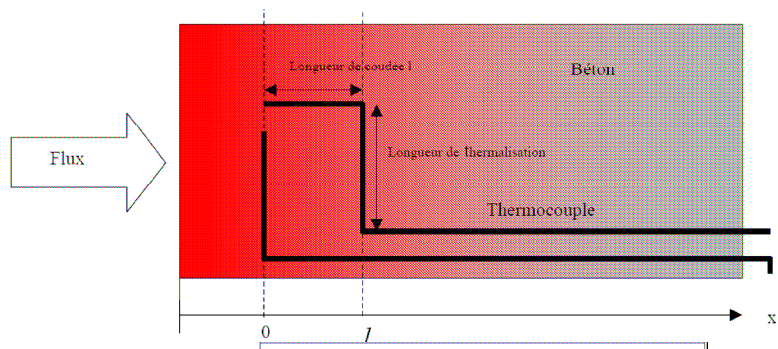
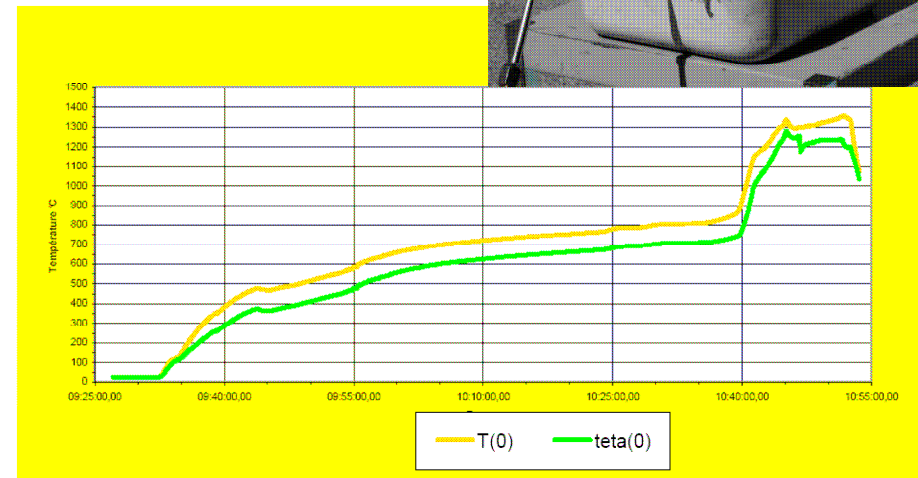
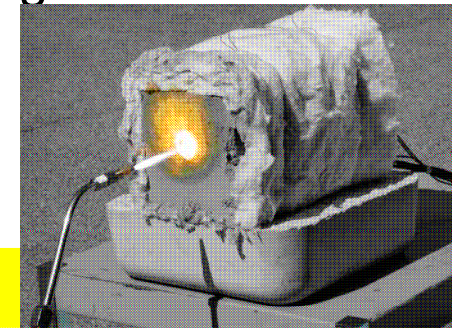


Figure 18: phénomène de macro-constriction



Modélisation thermique d'un thermocouple



energie atomique • énergies alternatives

- **Modélisation axisymétrique**

- 1 fil équivalent (1 fil 0.15 mm, 2 fils: $\sqrt{2}.r$)

- Isolant

- Gaine $R_{ext} = 0.75$ mm $e=0.2$ mm

- **Contraste conductivités**

- Chromel : $19 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

- Alumel : $31 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

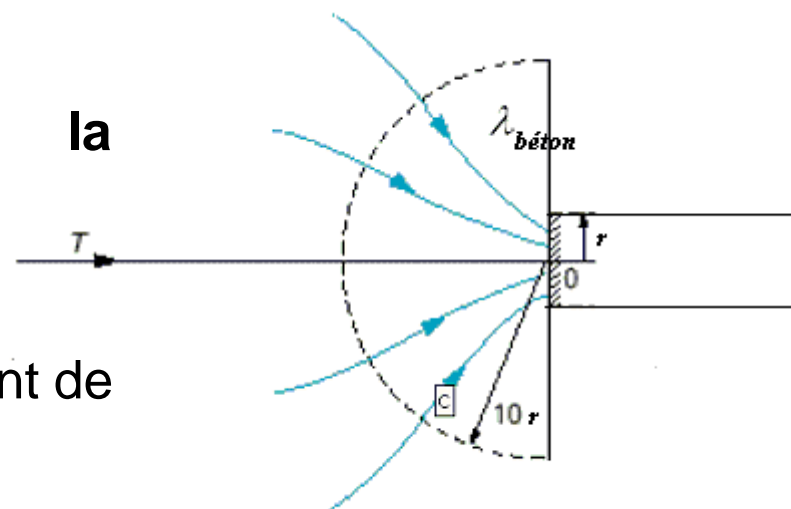
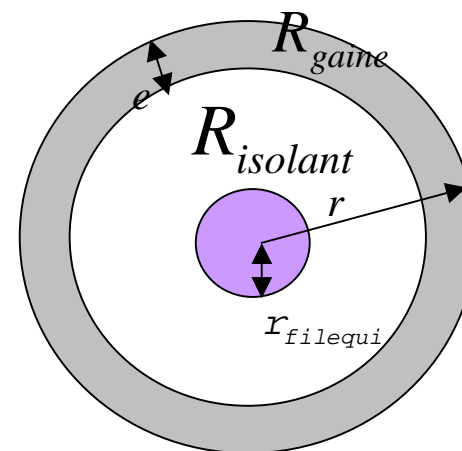
- *Fil équivalent* $25 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

- Magnésie en poudre : $0.84 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

- Inconel 600 : $14.8 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

- **Modélisation prenant en compte la macro-constriction**

- Régime permanent dans un gradient de température.



Modélisation thermique d'un thermocouple (2)



energie atomique • energies alternatives

$$\lambda_{\text{equi}} = \frac{\lambda_{\text{fils}} S_{\text{fils}} + \lambda_{\text{isolant}} S_{\text{isolant}} + \lambda_{\text{gaine}} S_{\text{gaine}}}{S_{\text{totale}}}$$

$$\lambda_{\text{equi}} \cong 10 \text{ W } \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$$

Résistance Thermique de contact et coefficient échange thermique

$$R_{\text{isolant}} = \frac{1}{2\pi\lambda_{\text{isolant}}l} \ln\left(\frac{r-e}{r_{\text{filequi}}}\right)$$

$$R_{\text{gaine}} = \frac{1}{2\pi\lambda_{\text{gaine}}l} \ln\left(\frac{r}{r-e}\right)$$

$$R_{\text{rad}} = R_{\text{isolant}} + R_{\text{gaine}}$$

$$R_{\text{rad}} = \frac{1}{2\pi r l h}$$

$$h \approx 1100 \text{ W } \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

Considérons un thermocouple suivant une isotherme

Soient θ et T les température dans le fil du TC et dans le béton

$$\theta(y) - T(y) \approx Ae^{my} + Be^{-my} \quad \text{avec} \quad m = \sqrt{\frac{2h}{\lambda r}}$$

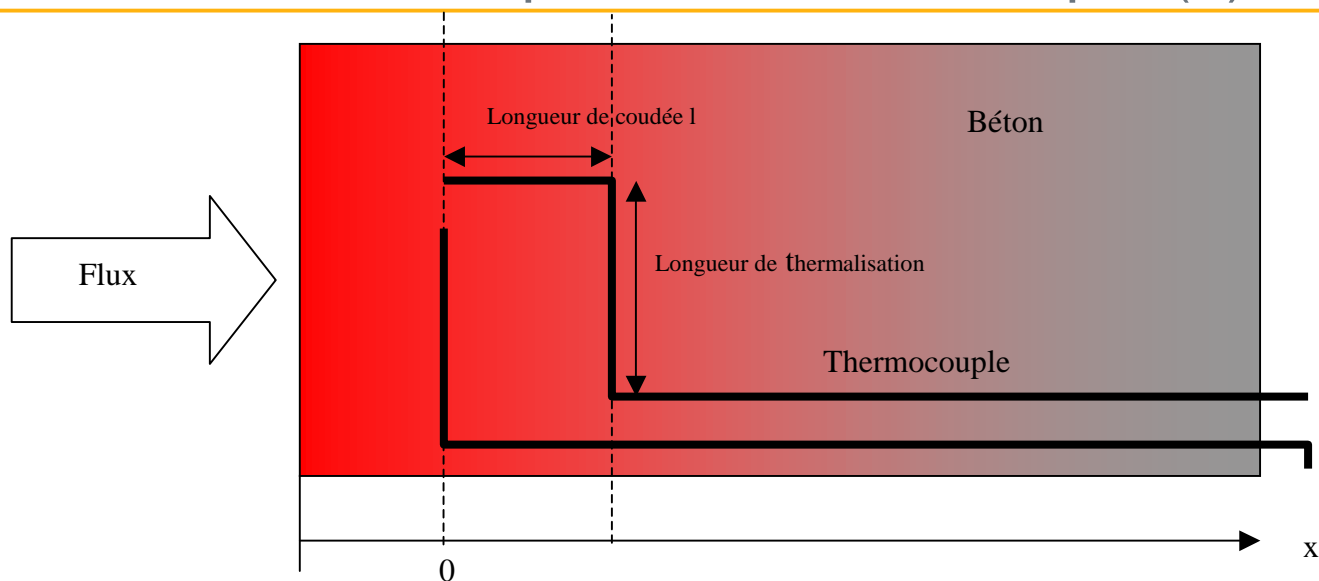
$B = 0$ car on thermalise après une longueur infinie....d'où

$$\frac{\theta(y) - T(y)}{\theta(0) - T(0)} = e^{-my}$$

Il faut typiquement 13 mm pour obtenir une thermalisation à 99,4%



Modélisation thermique d'un thermocouple (3)



On considère un champ linéaire de température dans le béton $T(x) = T(0)(1 - ux)$

On cherche à déterminer l'erreur absolue de mesure sur la température du béton.

$$\Delta = T(0) - \theta(0)$$

Pour ce faire effectuons le bilan de puissance, entre deux sections droites d'abscisse x et $x+dx$ de la partie coudée. On a, la section droite S étant constante :

$$-\lambda S \frac{d\theta}{dx} \Big|_x = -\lambda S \frac{d\theta}{dx} \Big|_{x+dx} + p dx h (\theta(x) - T(x))$$

D'où l'équation de la distribution de la température dans la longueur de coudée l :

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



Modélisation thermique d'un thermocouple (4)



energie atomique • énergies alternatives

- En prenant en compte la résistance de contact à la soudure chaude (estimée à 1900 K/W) et la résistance de constriction

$$R_m = \frac{1}{4r\lambda_{\text{béton}}} \approx 220 \text{ W K}^{-1}$$

- L'erreur de mesure Δ est donnée par:

$$\Delta = T(0) - \theta(0) = \frac{Rth(\sqrt{\frac{2h}{\lambda r}}l)}{R\sqrt{\frac{2h}{\lambda r}} + th(\sqrt{\frac{2h}{\lambda r}}l)} uT(0)$$

- le coefficient

$$\frac{Rth(\sqrt{\frac{2h}{\lambda r}}l)}{R\sqrt{\frac{2h}{\lambda r}} + th(\sqrt{\frac{2h}{\lambda r}}l)}$$

correspond à la distance entre le point de mesure et l'endroit où règne effectivement cette température. Il vaut dans ce cas 2 mm.

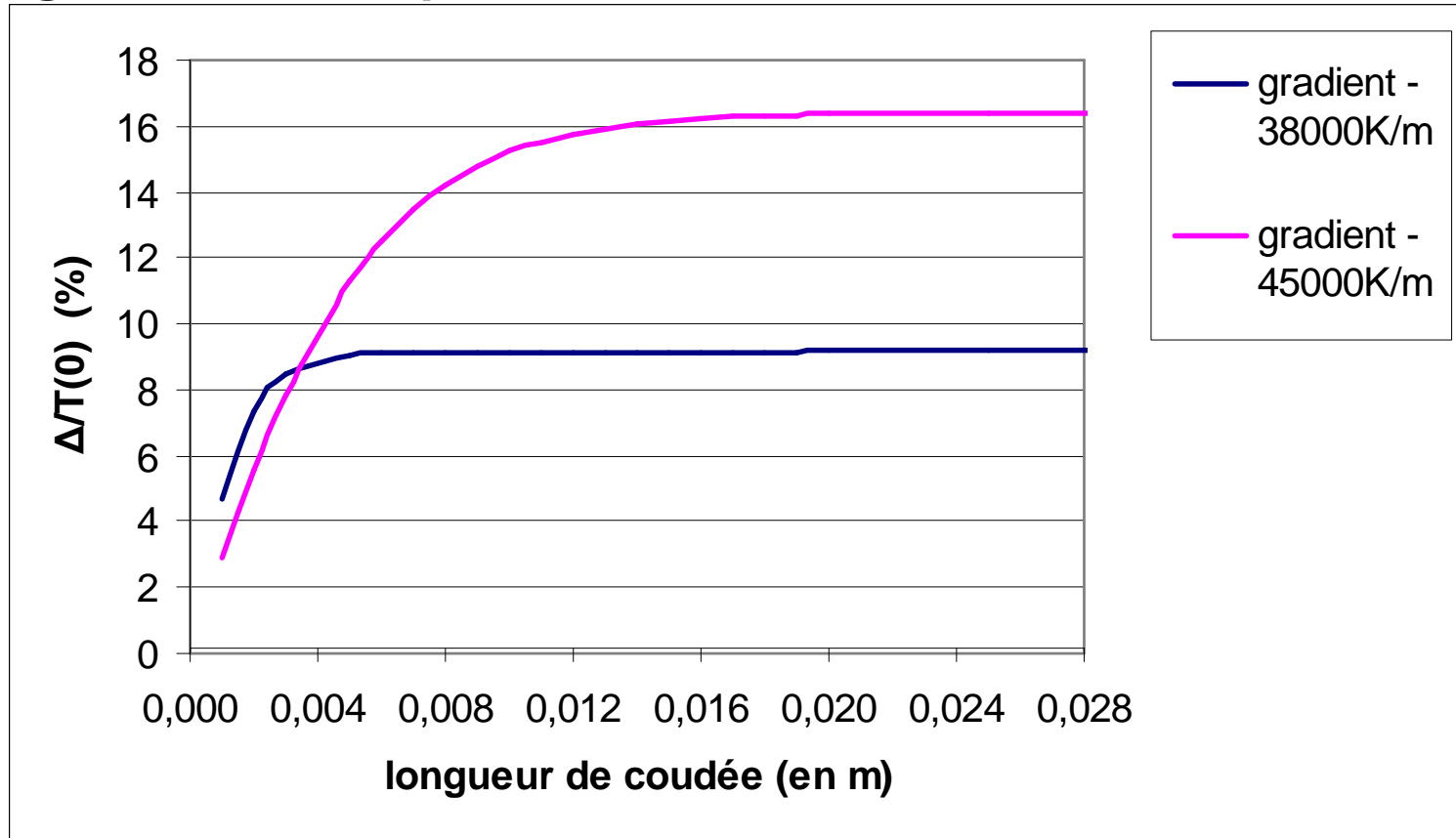


Modélisation thermique d'un thermocouple (5)



energie atomique • energies alternatives

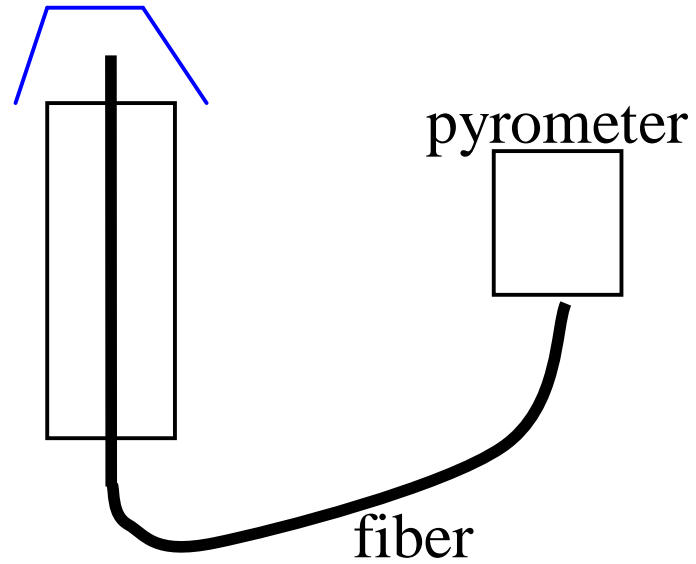
- **Erreur de mesure en fonction de la longueur de coudée et du gradient de température**



Mesures Intrusives par Pyrométrie (VNIIEF, Russie)



Refractory metal
(Mo, Ta or W)



Conclusions



energie atomique • énergies alternatives

- **Mesures intrusives:**

Problème de gainage tenant à la fois aux oxydes et au métaux
Effet perturbateur du capteur sur le champ de température

- > **Correspond à un décalage de plusieurs millimètres vers la zone froide dans des gradients élevés ($100 \text{ kW/m}^2 \sim 100 \text{ K/mm}$)**

- **Etalonnage- Calibration**

Difficultés d'étalonnage à haute températures

- > **Incertitude supérieure aux écarts de température à considérer pour nos application (T_{liq}-T_{sol}), (T_{bain}-T_{interf})....**

Intérêt pour moyen d'intercalibration

Points fixes de terrain (incertitude 5-10 K)

