



Mesure des hautes températures : *quelle traçabilité et quelles incertitudes peut-on espérer ?*

Mohamed SADLI

Hautes Températures et Pyrométrie Optique

Laboratoire Commun de Métrologie – LNE-Cnam

- Introduction
- Echelle internationale de température au dessus de 1000 °C
- Pyrométrie optique : erreurs et incertitudes
- Thermométrie de contact à haute température : difficultés de mesure
- Points fixes à haute température : une révolution
- Solutions pour l'industrie et la recherche dans le contexte européen
- Conclusion



- Références de température ? T est une grandeur intensive !
- Méthodes de mesure ? Eviter les erreurs systématiques
- Instruments ? Stables, simples d' utilisation, fiables
 - Echelle internationale de température : références comparables et stables (points fixes de changement de phases), des instruments et des formules d' interpolation ou d' extrapolation
 - Amélioration continue des références et des méthodes pour diminuer l' incertitude et rapprocher la température dans l' échelle de la température thermodynamique



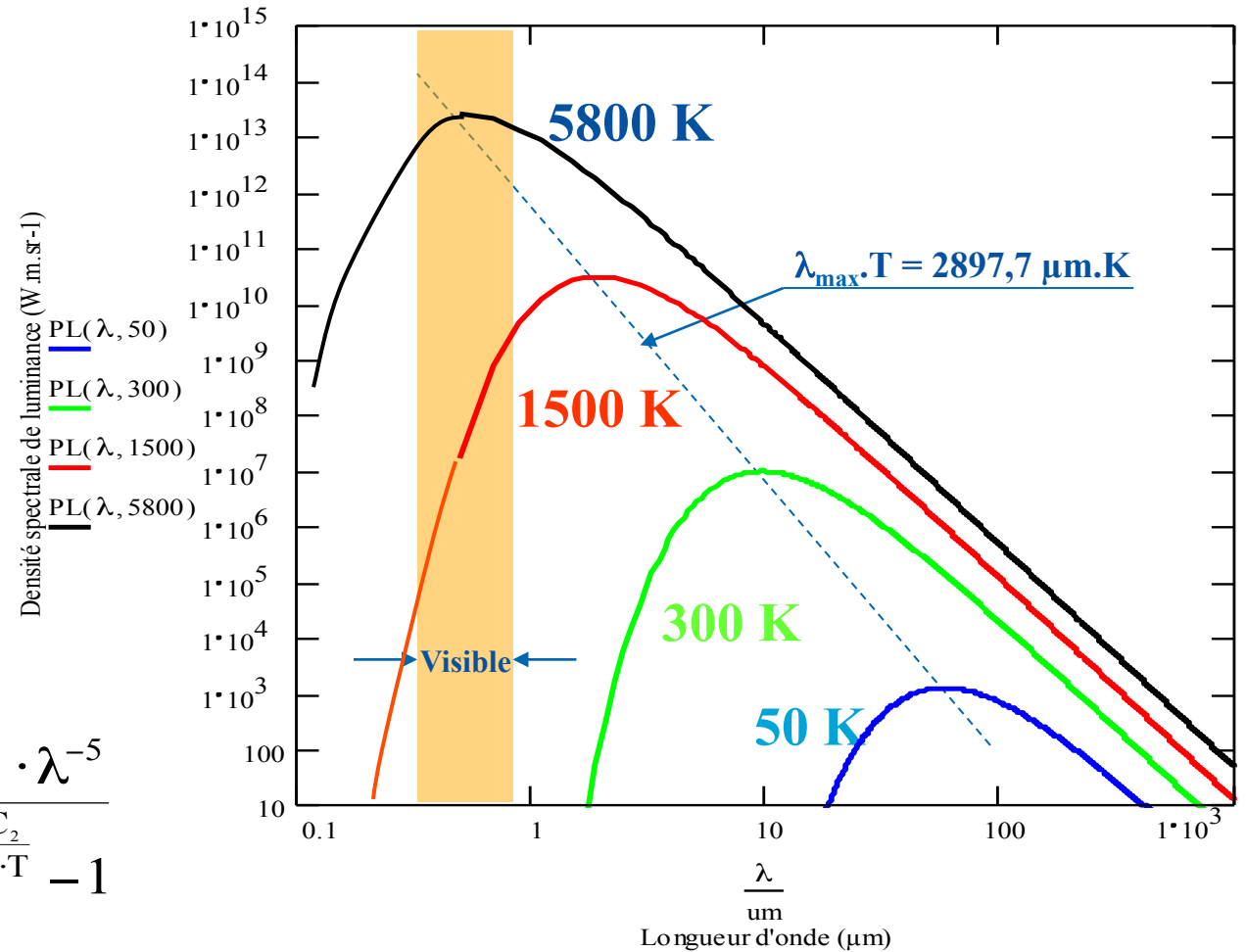
Tout objet, porté à une température T , émet un rayonnement thermique. Le but d'une mesure pyrométrique est de déterminer la température en mesurant/comparant le rayonnement thermique.



La loi de Planck relie la densité spectrale de luminance d'un corps noir à sa température.

Le niveau de rayonnement est lié à la température et à la longueur d'onde.

$$L_{\lambda, \text{CN}}(\lambda, T) = \frac{2 \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot \left[e^{\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T}} - 1 \right]} = \frac{C_1 \cdot \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} - 1}$$

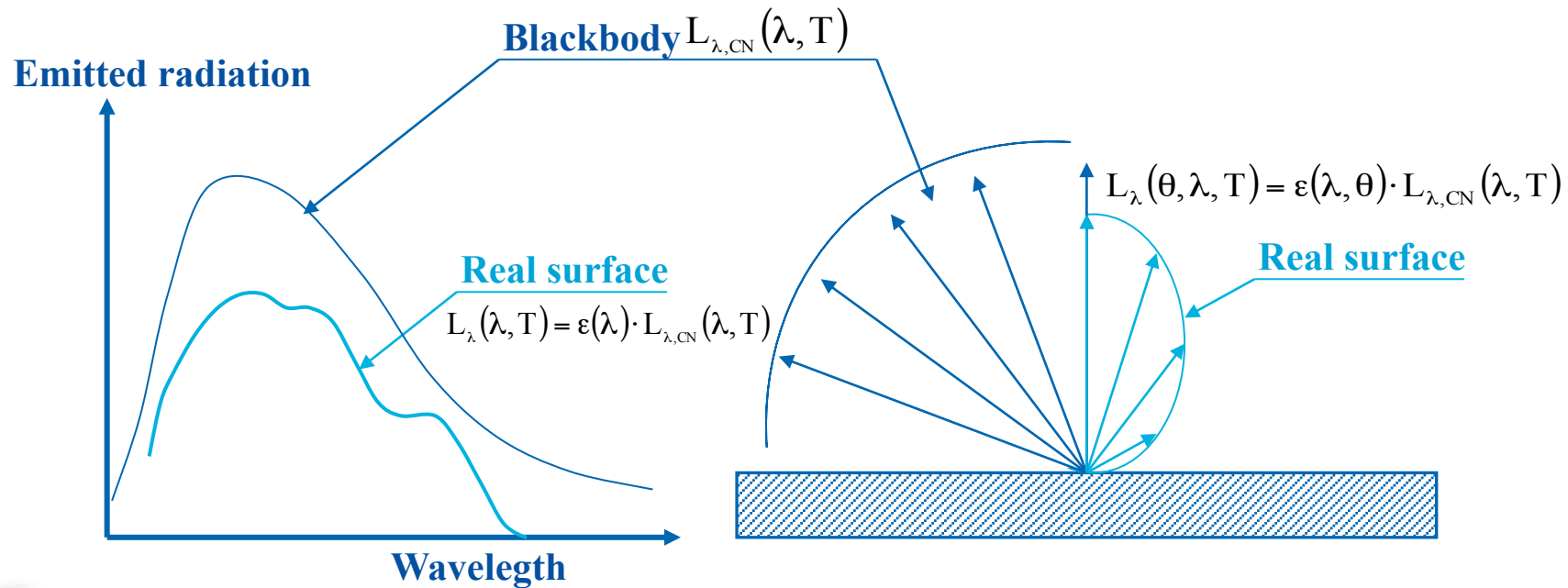


La notion de corps noir est idéale :

« aucune surface ne peut émettre autant de rayonnement qu'un corps noir porté à la même température »

$$\text{Emissivity of a surface} = \frac{\text{radiation emitted by the surface}}{\text{radiation emitted by a perfect blackbody}}$$

L'émisivité :



Au-dessus du point fixe de l'argent (961.78 °C) la température T_{90} est définie par l'équation :

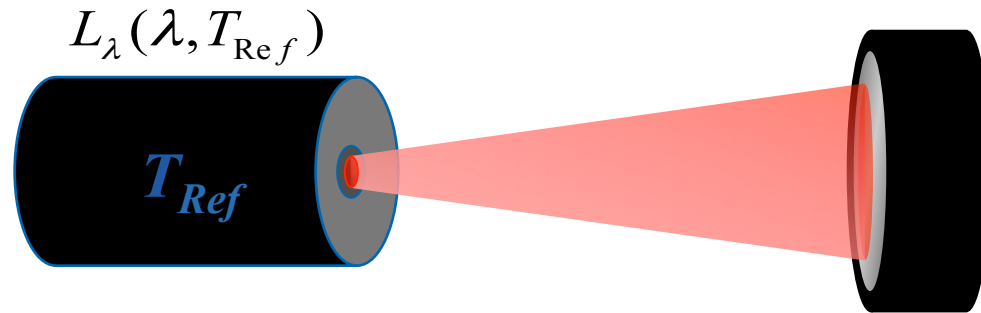
$$\frac{L_{\lambda, BB}(T_{90})}{L_{\lambda, BB}(T_{90}(FP))} = \frac{e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T_{90}(FP)}} - 1}{e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T_{90}}} - 1}$$

où

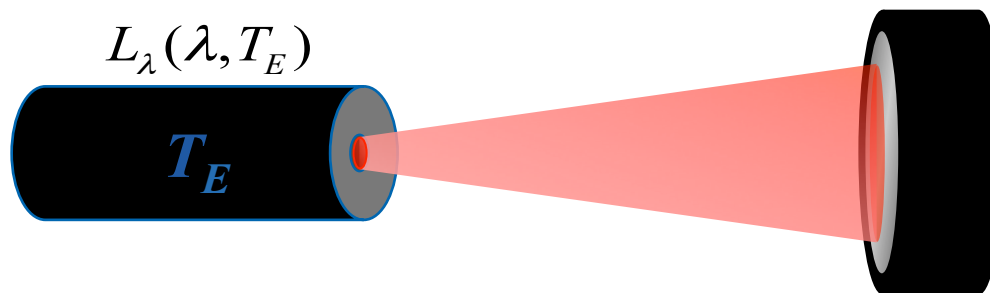
$T_{90}(FP)$ est la température des points de congélation de l'argent (1234,93 K), du cuivre (1357,77 K) ou de l'or (1337.33),

$L_{\lambda, BB}(T_{90})$ et $L_{\lambda, BB}(T_{90}(FP))$ sont les densités spectrales d'un corps noir à la longueur d'onde λ (dans le vide) à T_{90} , et à $T_{90}(FP)$ respectivement
 $c_2 = 0.014388 \text{ m.K}$.





$$R_{Ref} = \alpha \int_0^\infty S(\lambda) \cdot L_\lambda(\lambda, T_{Ref}) \cdot d\lambda$$

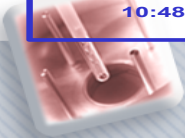
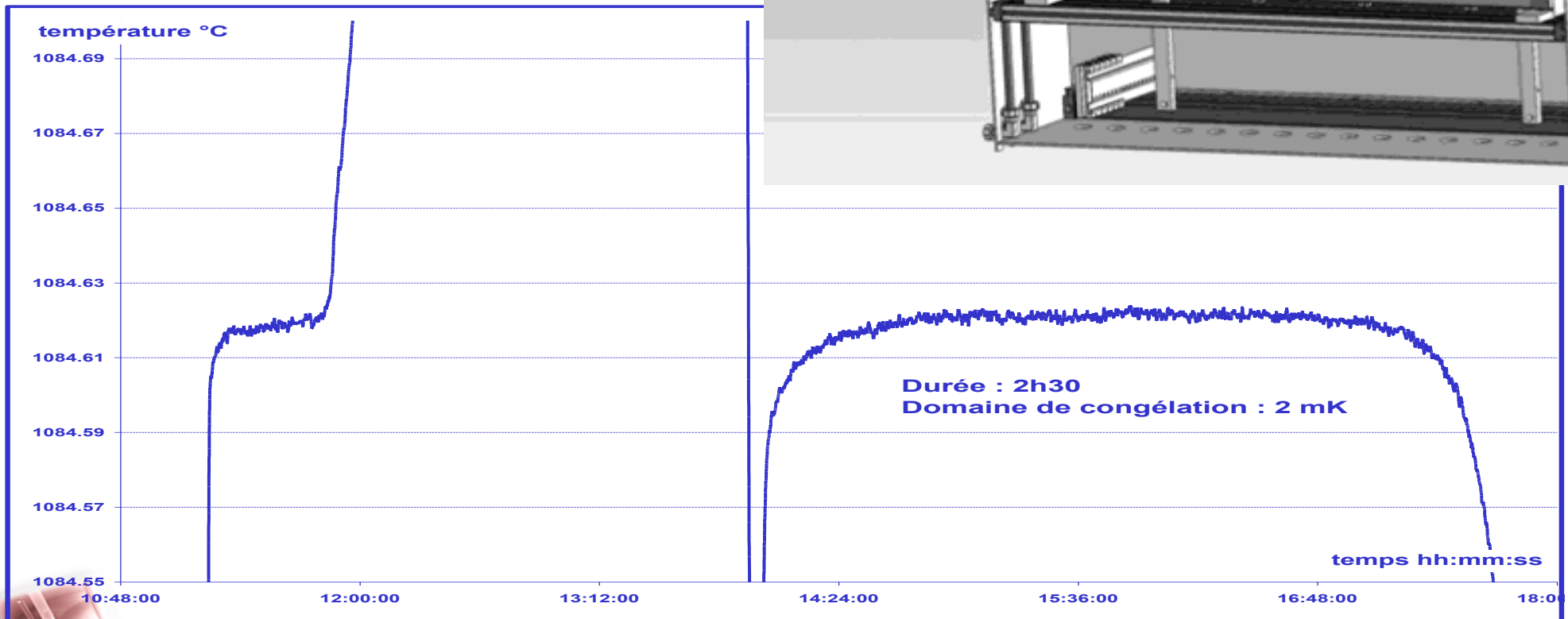
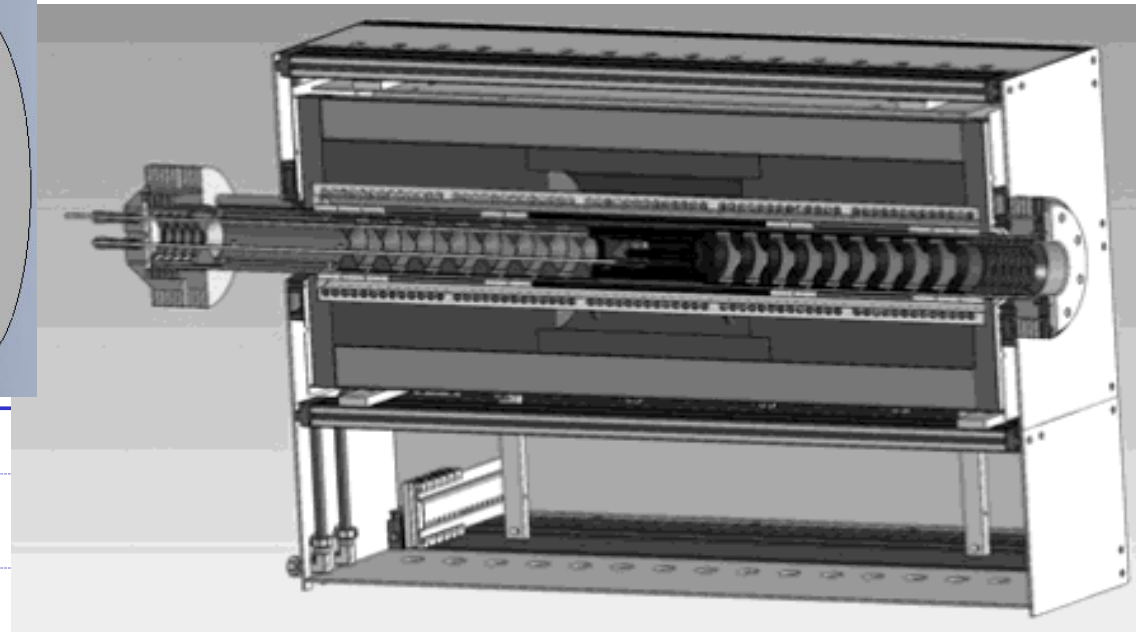
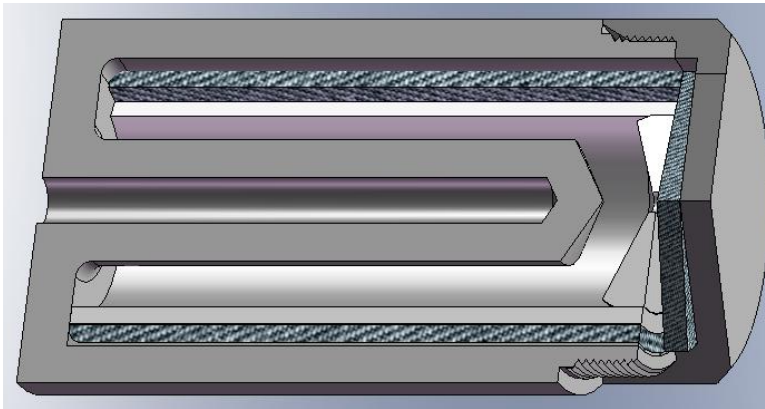


$$R_E = \alpha' \int_0^\infty S(\lambda) \cdot L_\lambda(\lambda, T_E) \cdot d\lambda$$

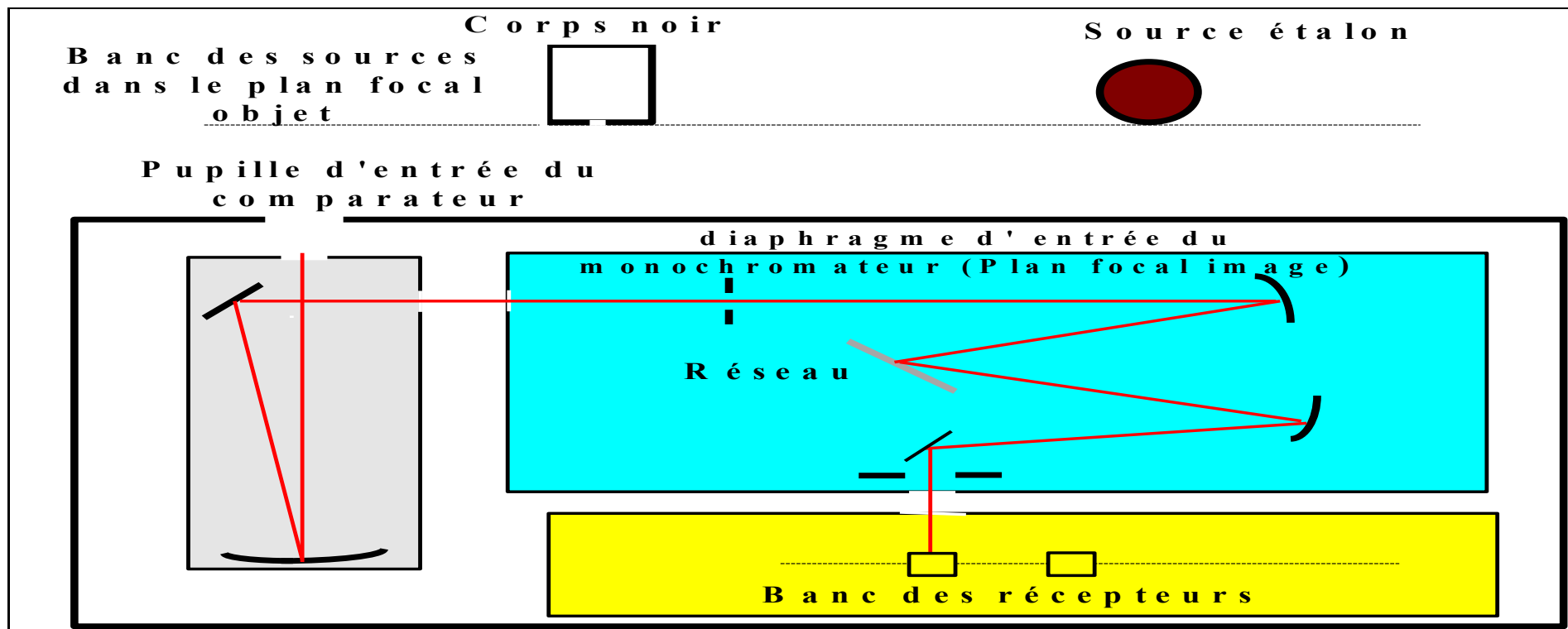
$$\frac{L_\lambda(T_E)}{L_\lambda(T_{Ref})} = \frac{\exp\left[\frac{c_2}{\lambda T_{Ref}}\right] - 1}{\exp\left[\frac{c_2}{\lambda T_E}\right] - 1} = \frac{R_E}{R_{Ref}}$$





Point fixe du cuivre : 1357,77 K



Comparateur de luminances

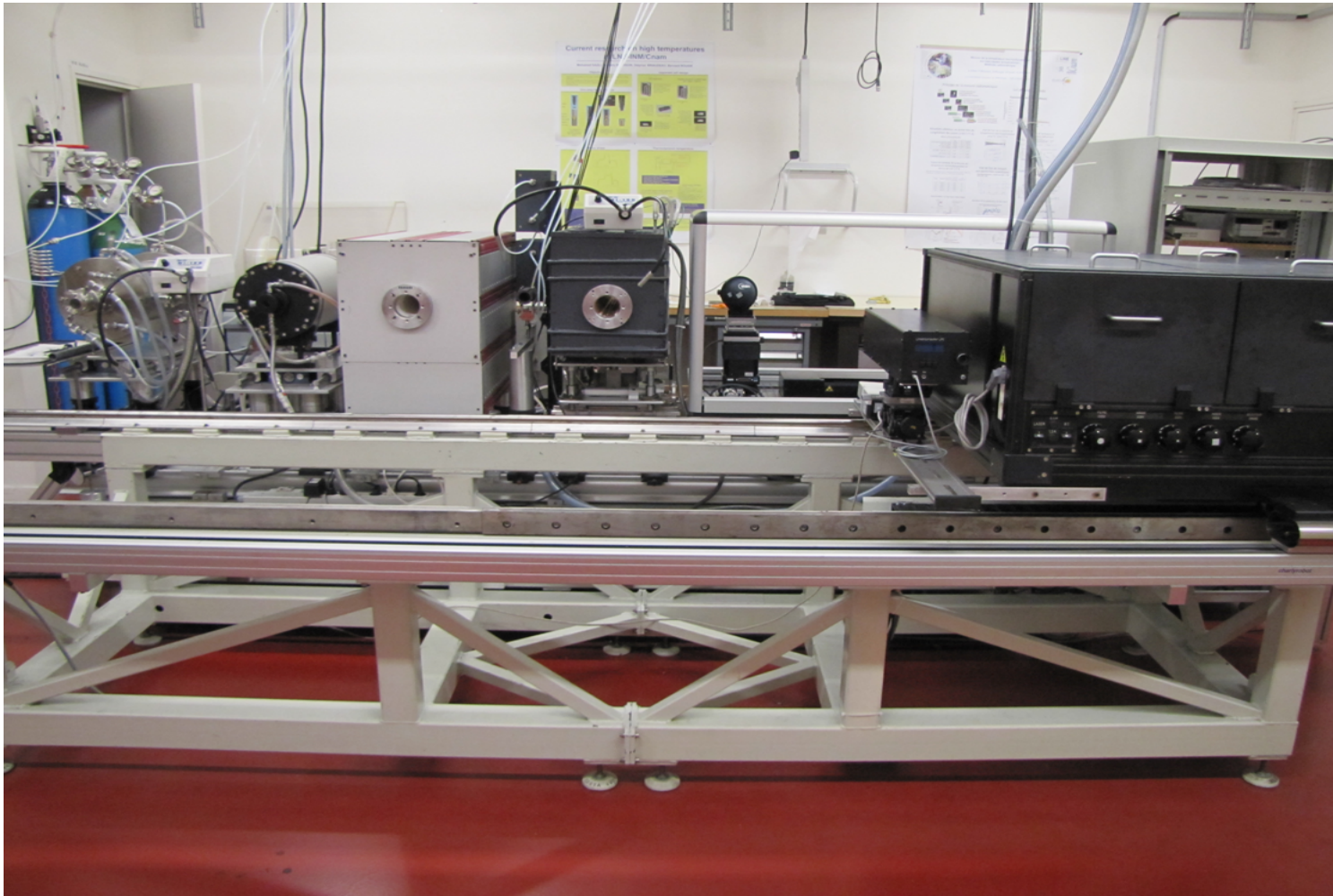



Sélection d'une étendue géométrique

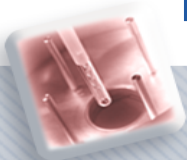

Sélection spectrale


Détection

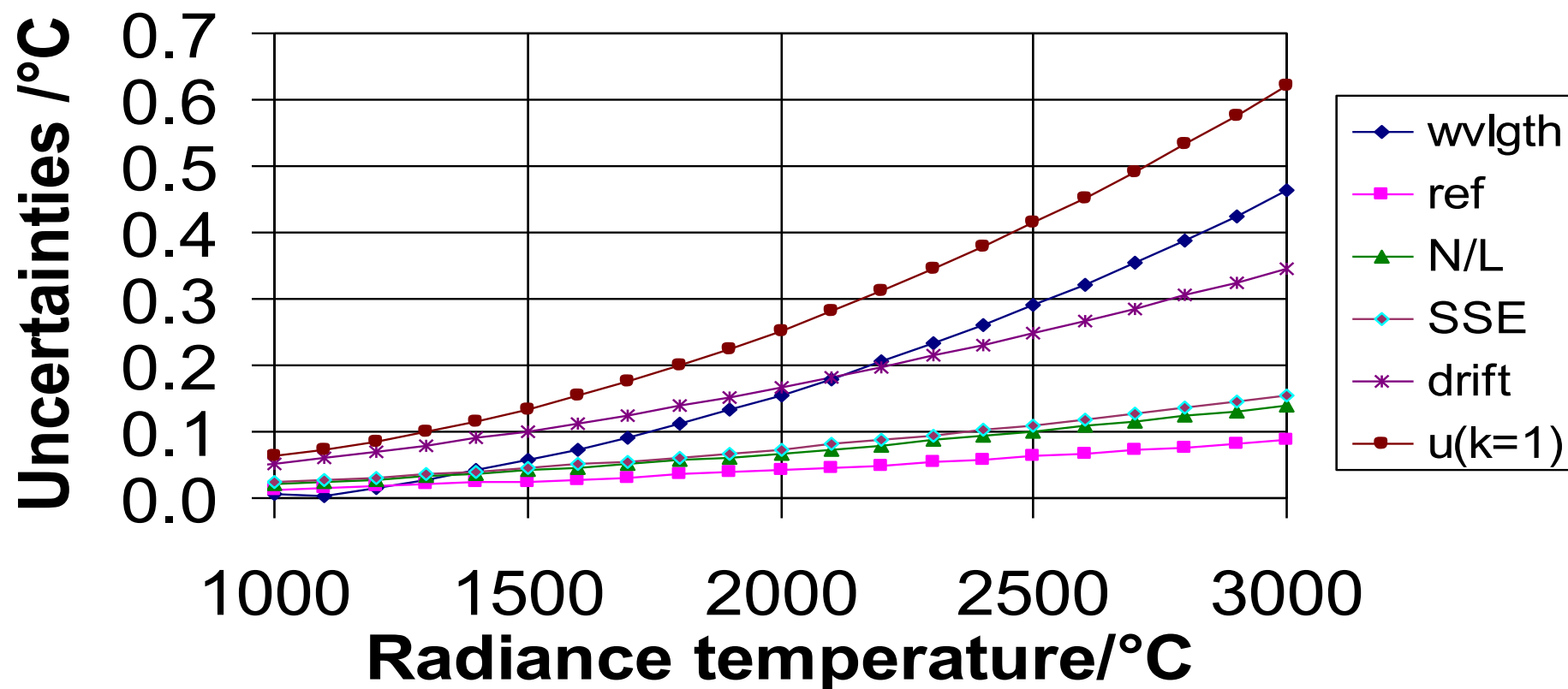




LNE-Cnam : Points fixes Ag ou Cu dans des fours 3 zones + comparateur de luminances



Reference thermometer uncertainty

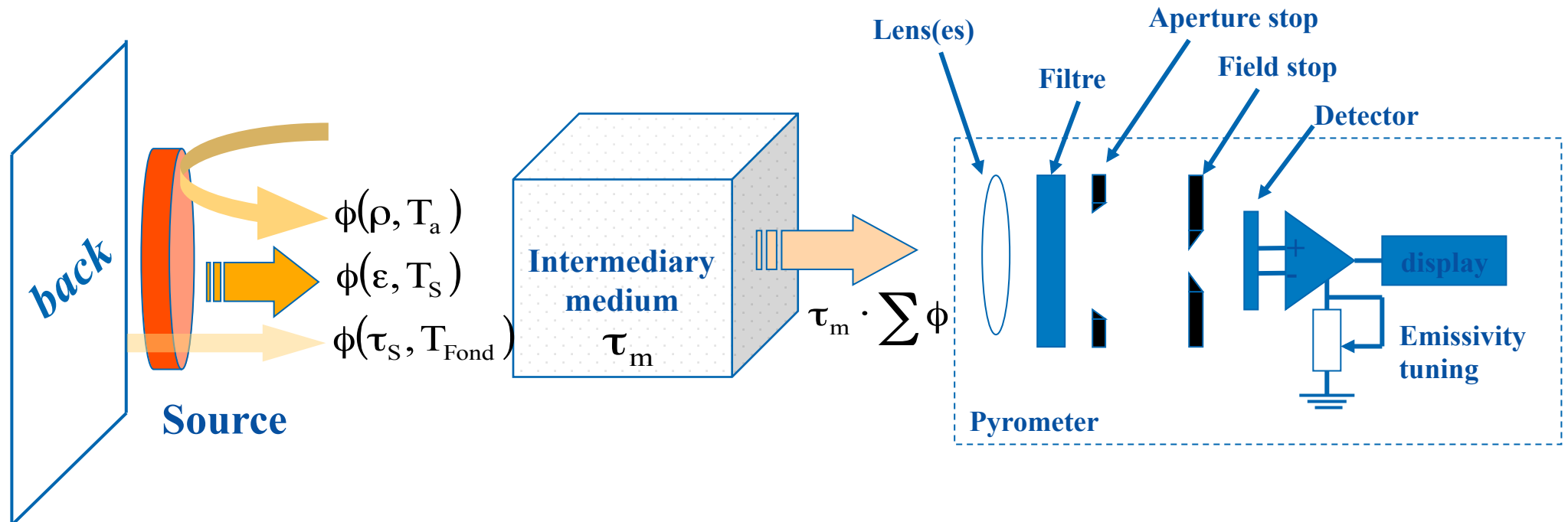


- Les mesures de température par pyrométrie optique (monochromatique) peuvent être entachées d'erreurs dues à :
 - Défaut d'alignement, vignettage, qualité optique moyenne
 - Méconnaissance de l'émissivité
 - Instabilité du pyromètre (électronique)
 - Effets des conditions ambiantes

- Connaître les propriétés optiques du matériau de la cible est aussi important que de connaître l'instrument de mesure

- Le choix du pyromètre doit être fait en fonction de l'application (champ de visée, domaine spectral, température d'utilisation..)

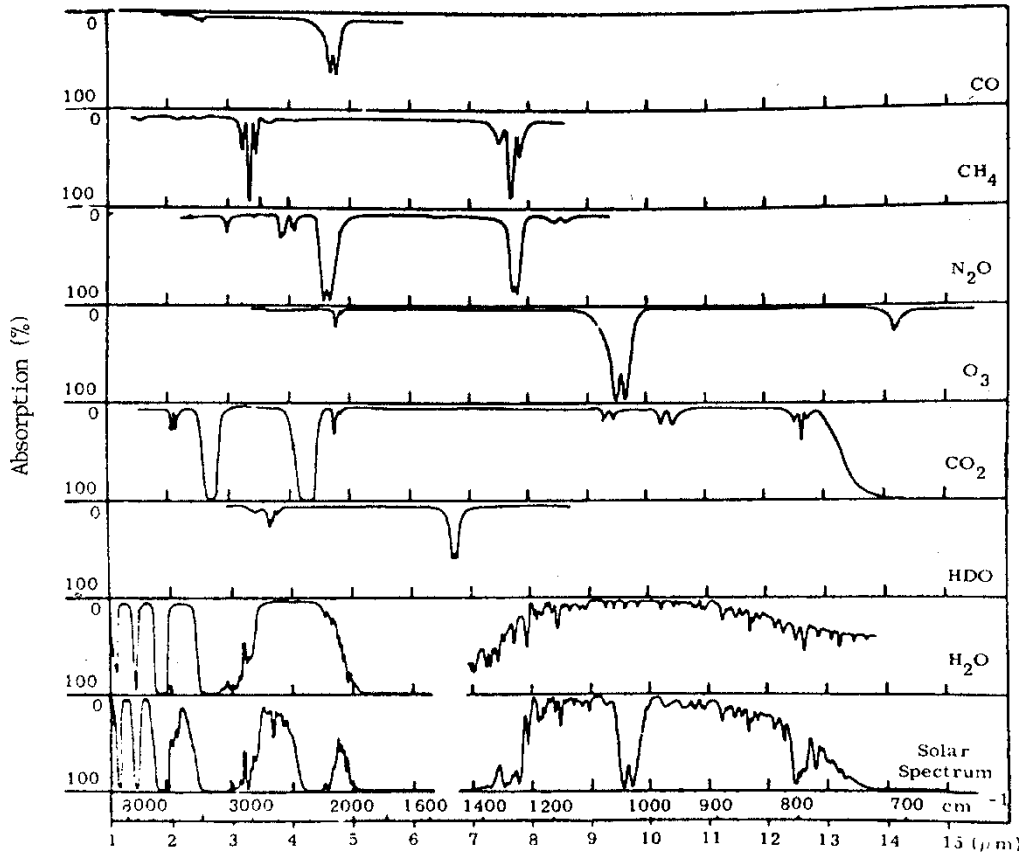




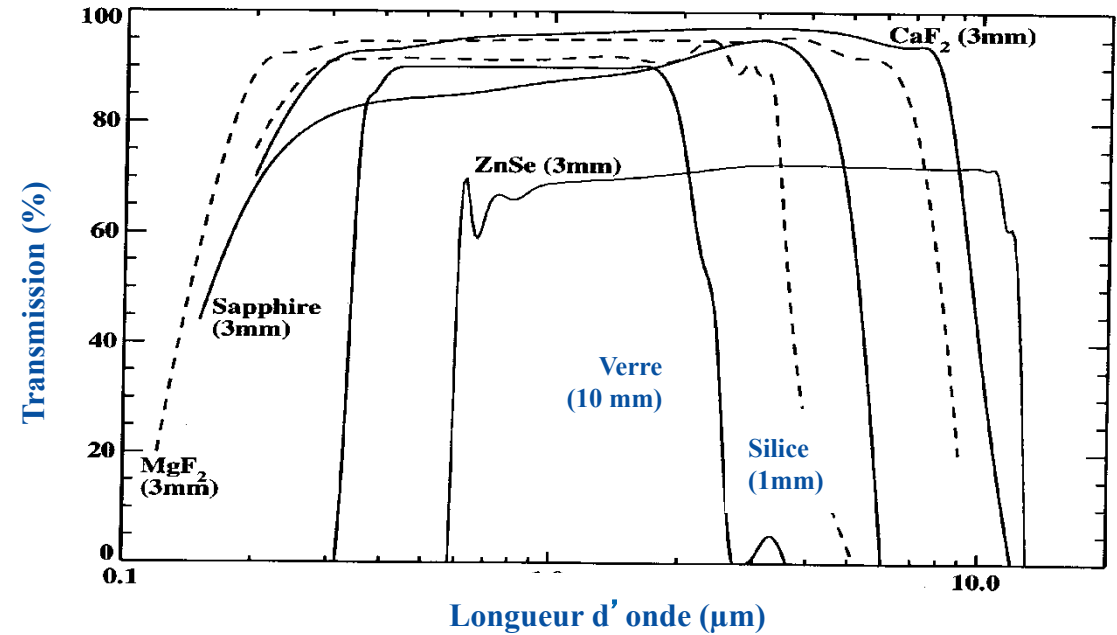
- Contribution du rayonnement ambiant réfléchi sur la surface
- Transmission à travers la source
- Absorption du rayonnement par le milieu intermédiaire (air, gaz, hublots..)



Absorption



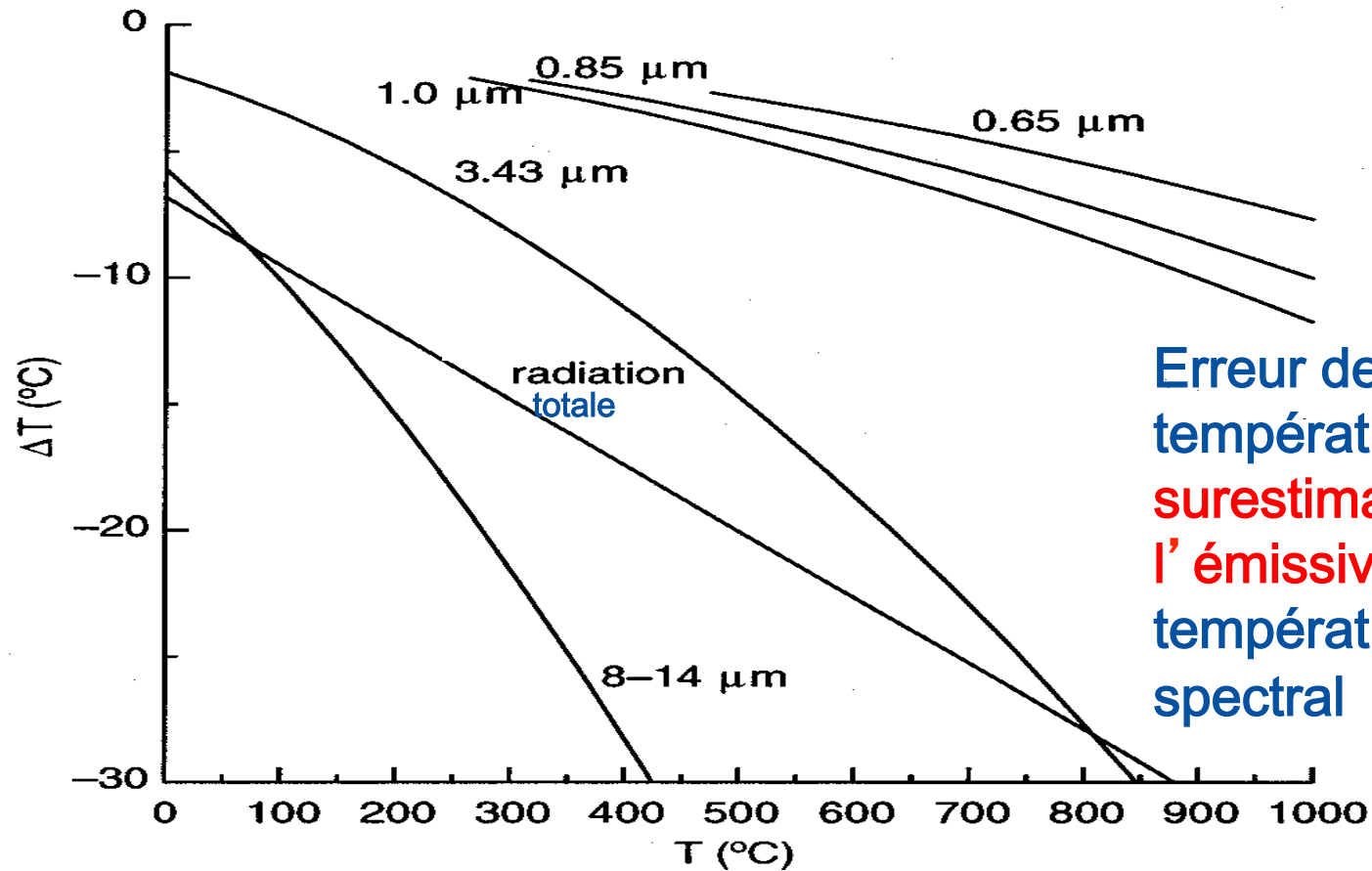
← Nombre d'onde (cm⁻¹)
→ Longueur d'onde (μm)



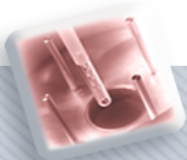
Source d'erreur en cas de différence notable entre conditions d'étalonnage et conditions de mesure.

Difficulté de mesurer à travers des hublots.

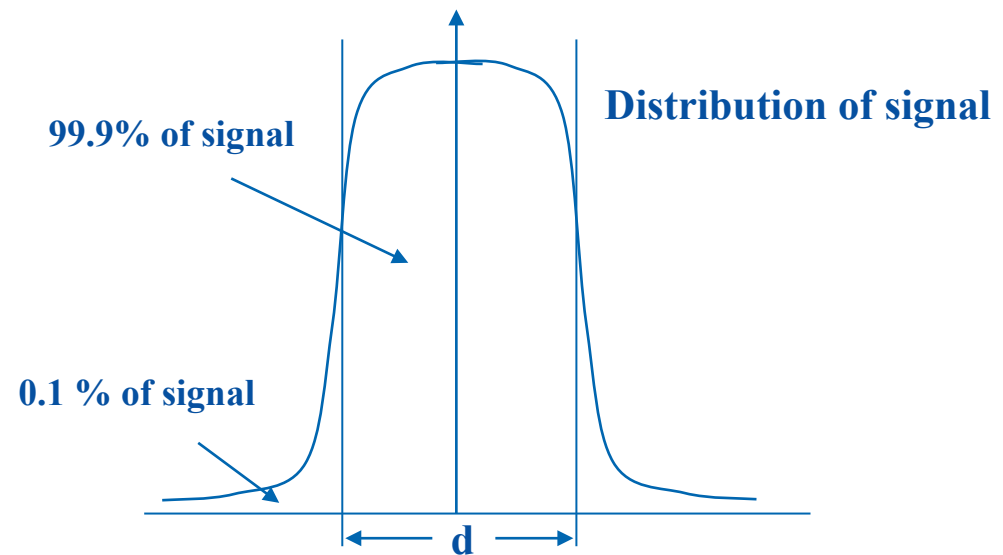
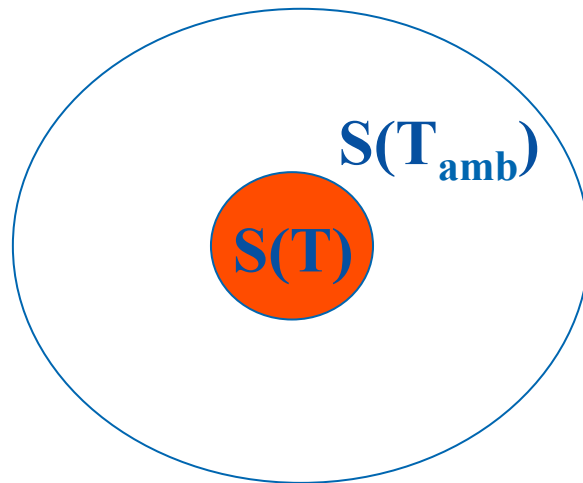




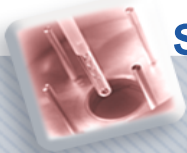
Erreur de mesure de température due à une surestimation de 10% de l'émissivité en fonction de la température et du domaine spectral

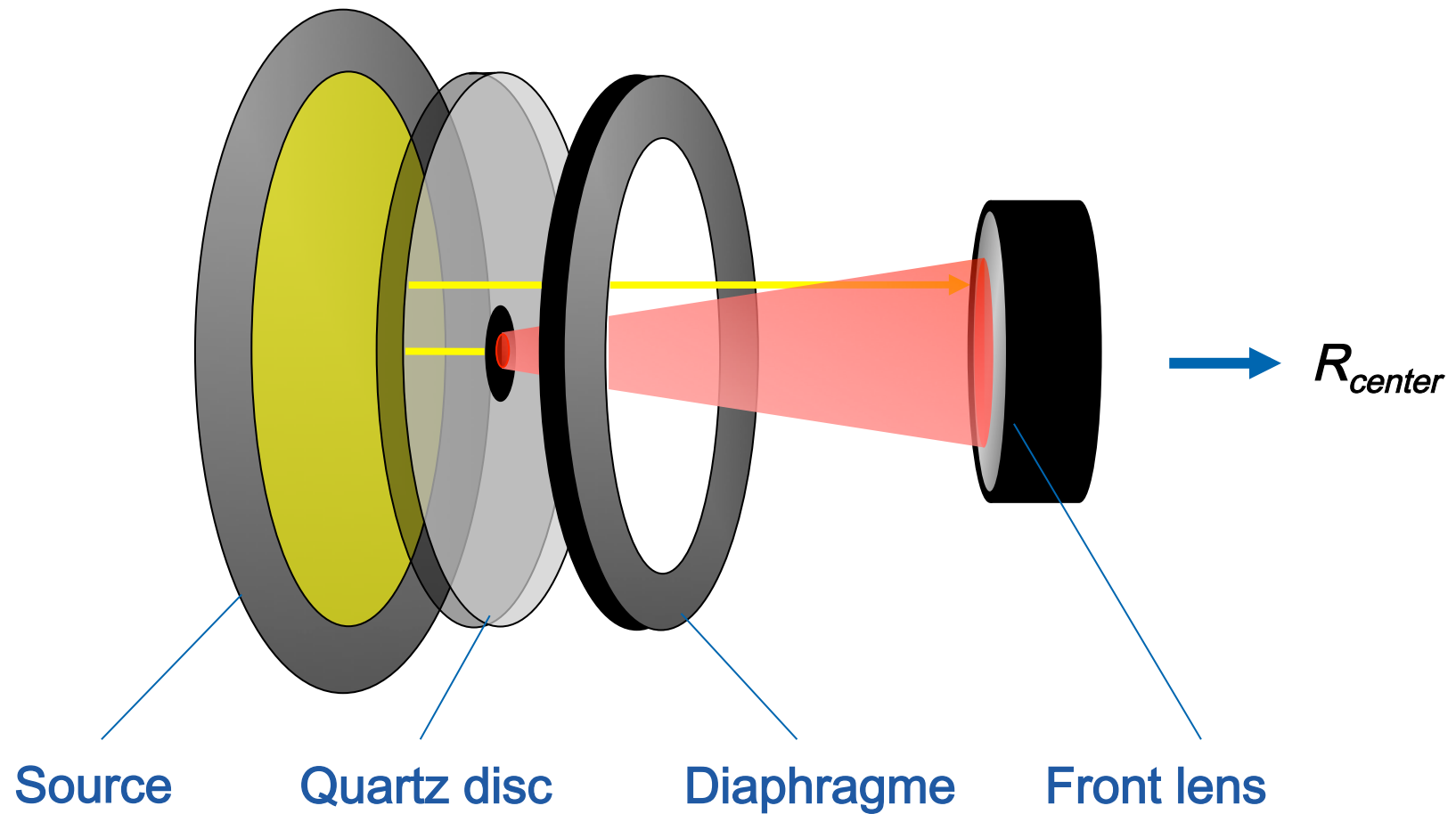


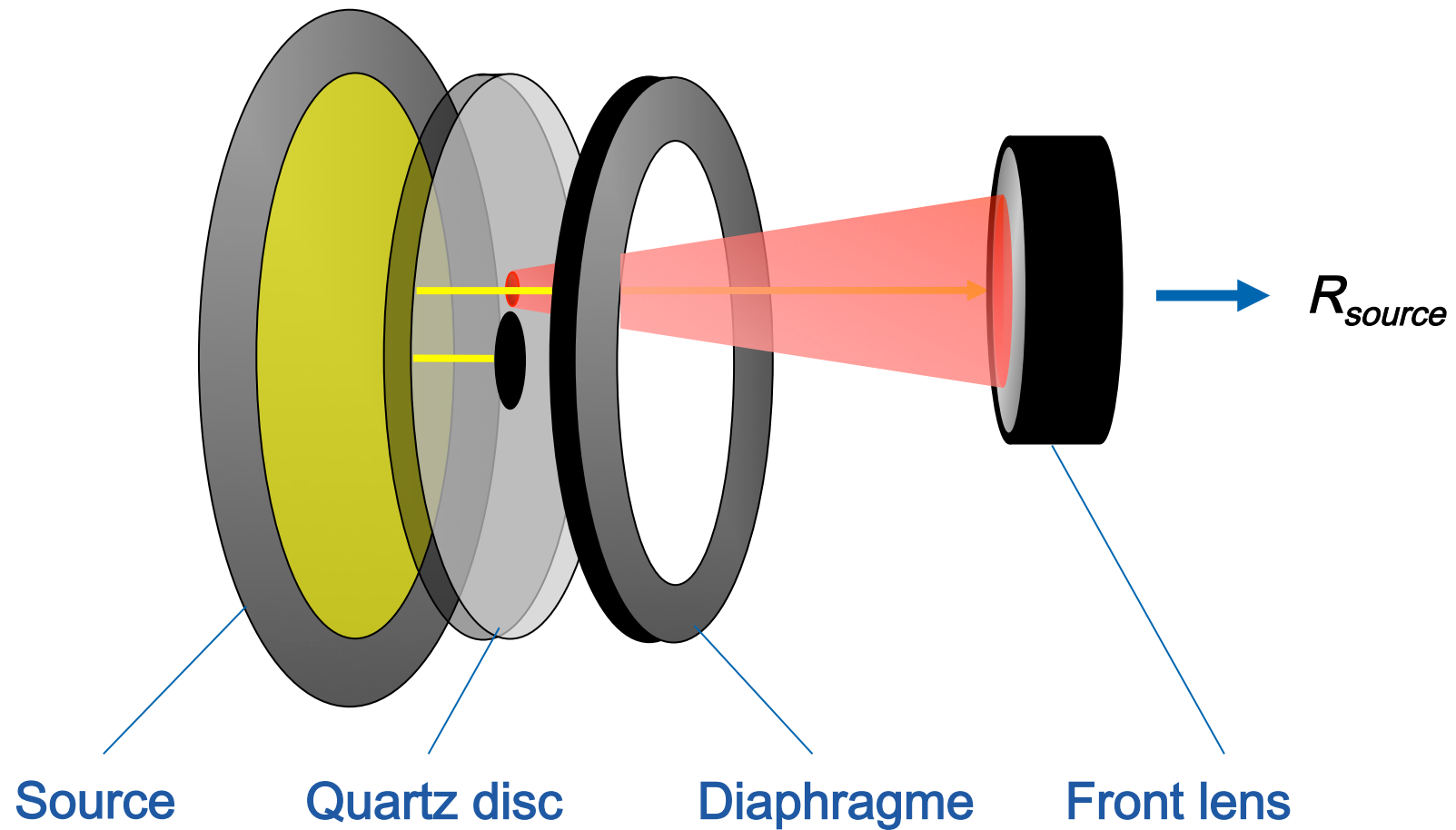
- ✓ Influence du rayonnement ambiant
- ✓ Effets des aberrations optiques
- ✓ Diffraction et diffusion sur et entre les éléments du pyromètre



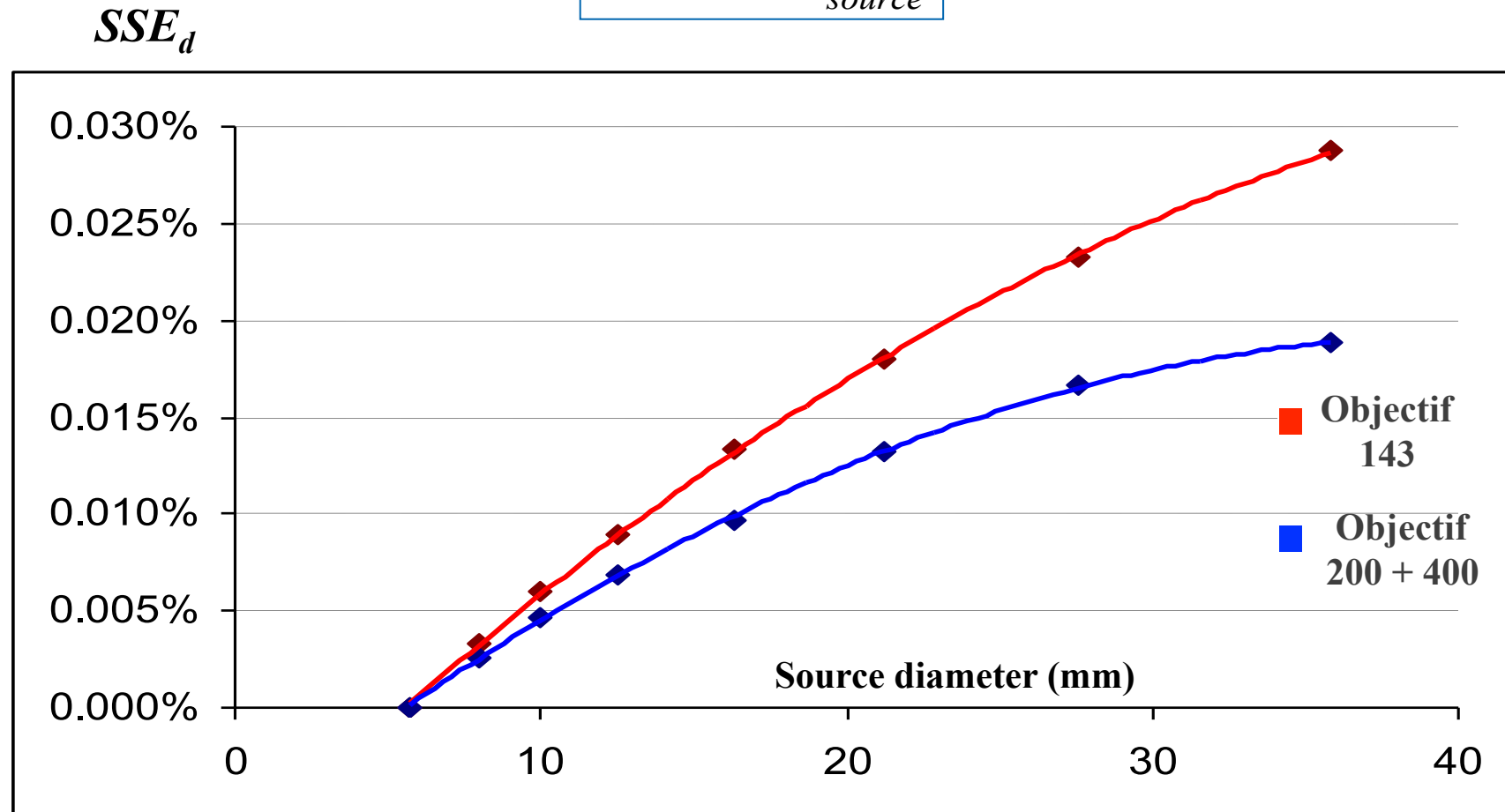
Cette caractéristique doit être connue si les incertitudes recherchées sont particulièrement basses.







$$SSE_d = \frac{R_{center}}{R_{source}}$$



- Globalement la source apporte une incertitude non négligeable lors d'une mesure pyrométrique
- Un pyromètre peut être étalonné au meilleur niveau d'exactitude avec une incertitude de l'ordre de 1 °C à 2000 °C.
- La méconnaissance de l'émissivité peut induire des incertitudes de plusieurs degrés !
- L'effet de taille de source peut induire des corrections de l'ordre de quelques 10^{-3} sur le signal (quelques 0,1 K) et des incertitudes du même niveau
- Un pyromètre requiert un suivi et un contrôle continu pour déceler toute dérive importante



- Méthodes multispectrales (y compris bichromatiques)
- Utiles pour s' affranchir de l' effet des hublots et de champs de visée inadaptés
- Nécessitent la vérification des hypothèses sur l' émissivité de la cible (corps gris ou émissivité constante sur la bande spectrale considérée)
- Incertitudes relativement élevées notamment si le choix des longueurs d' onde de travail ne tient pas compte de la sensibilité de l' instrument
- Difficultés d' étalonnage de ce type de pyromètres



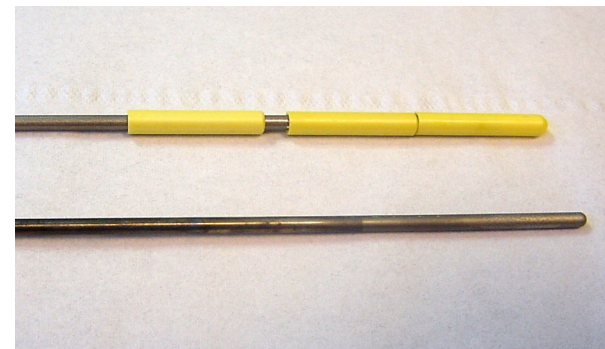
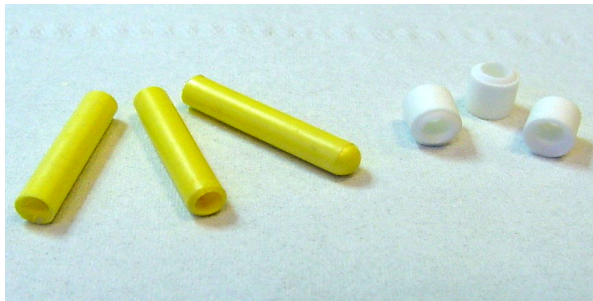
- 1000 °C – 1200 °C Principalement thermocouples de type K ($40 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$), type N, T...
- Difficultés avec les thermocouples : instabilité, inhomogénéités, limites de température de 1100-1200 °C pour les types K et N
- Jusqu' à 1500 °C, thermocouples Pt/Pd sont prometteurs en termes de stabilité, mais ils sont onéreux et leur fragilité les cantonne à une utilisation en laboratoire uniquement
- Au-delà de 1500 °C, la famille des W/Re permet d' atteindre jusqu' à 2300 °C mais la stabilité n' est pas au rendez-vous
- De nouveaux thermocouples sont à l' étude (Ir/Ir-Rh, Pt-20%Rh/Pt-40%Rh..)
 - A l' utilisation : compatibilité des matériaux non garantie, surtout au-dessus de 1500 °C



Techniques pour la stabilisation des TCs W/Re au LNE-Cnam



- ✓ Thermocouples W-Re / gaine Mo
⇒ + Perles de ZrO₂ - 1750 °C



- ✓ Thermocouples W-Re / gaine Ta
⇒ *surgaine en graphite* – 1950 °C



- Thermocouple W-Re

Ta and SiC



Ta and C



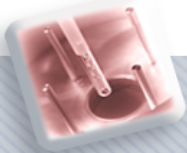
HIMERT project 2001-2005

➤ Results after 50 h @ 1950 °C :

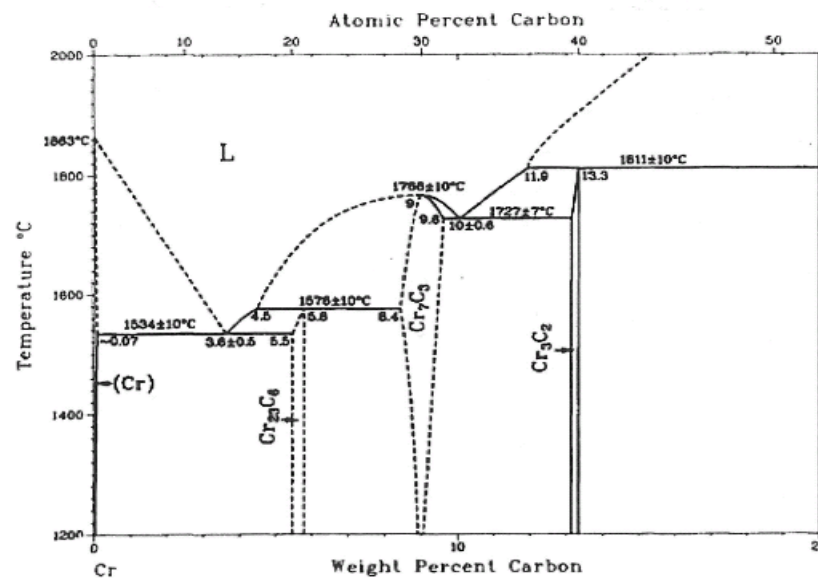
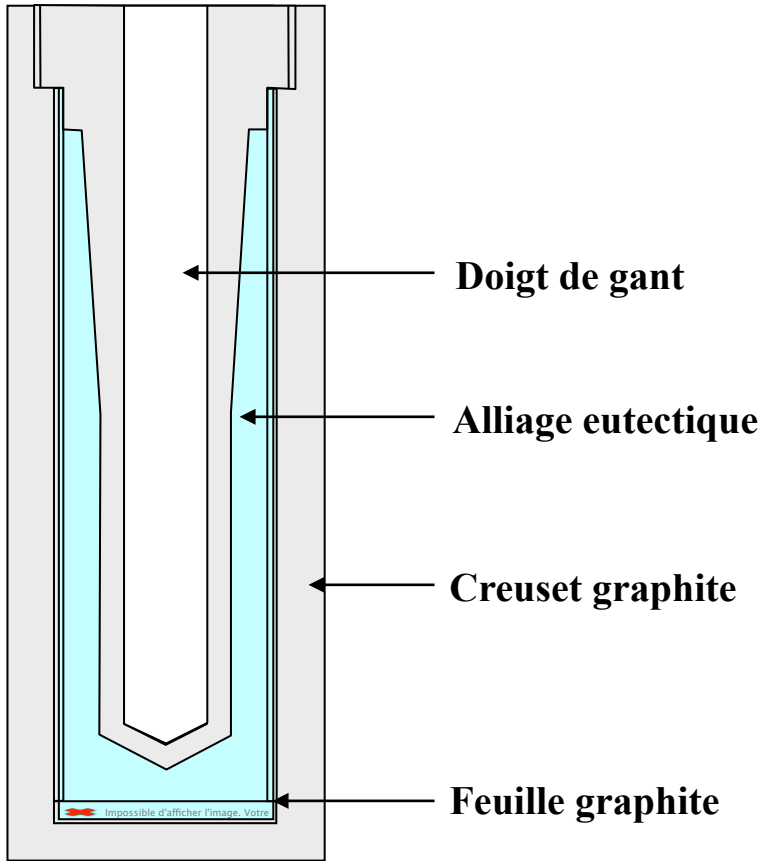
Association :	Molybdène	Tantale	Graphite pur
SiC	-	-	++
ZrO ₂ -8%Y ₂ O ₃	+	+	+
Graphite pur	-	+	/



- La réalisation de l' échelle au-dessus 1000 °C se ferait par interpolation entre ces points et non par extrapolation comme actuellement : meilleures incertitudes
- Les applications sont autant en pyrométrie optique qu' en thermométrie de contact. La traçabilité serait basée sur les points fixes qui pourraient même être vecteurs de température thermodynamique
- Moyens pratiques pour une vérification rapide de la stabilité des instruments de mesure à la température de travail
- Moyens de ré-étalonnage in-situ des instruments de mesure et de régulation
 - Réalisation et étude de PFHT depuis 2001
 - Comparaisons multiples
 - Températures thermodynamiques de changement de phase déterminées
 - Nouvelle mise-en-pratique de la définition du kelvin @ HT (site [www BIPM](http://www.BIPM))



Points fixes HT à l'étude au LNE-Cnam



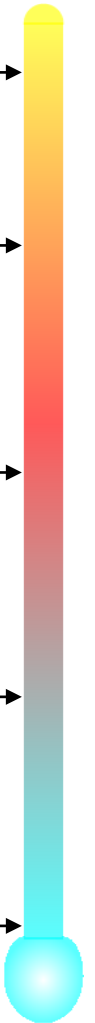
Ru-C →
1953 °C

Pt-C →
1738 °C

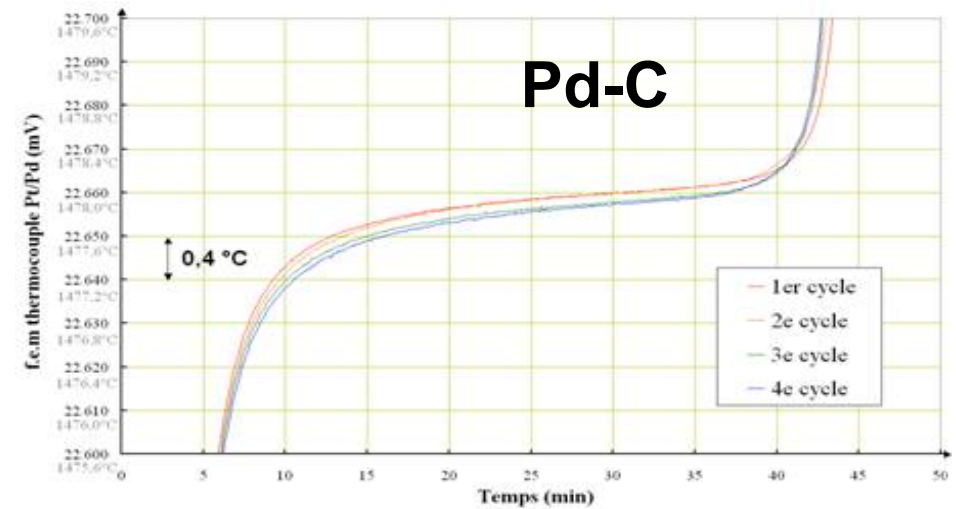
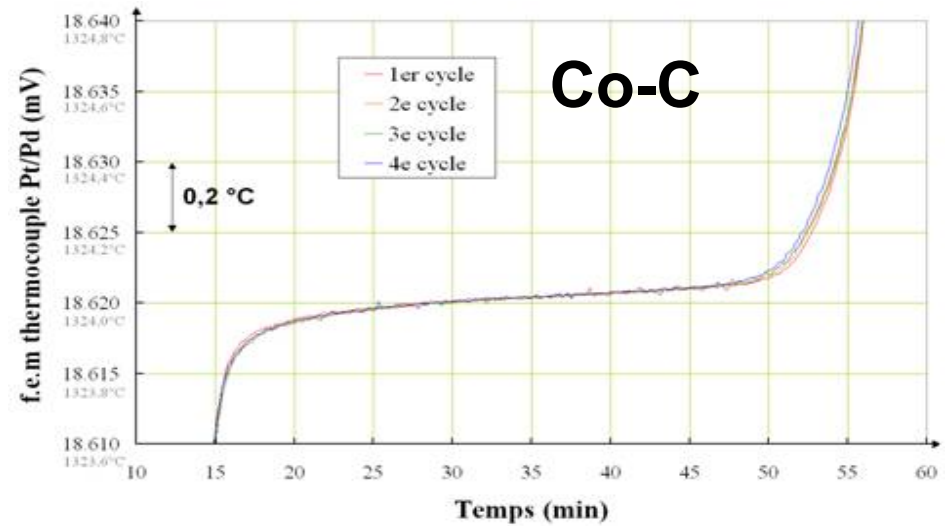
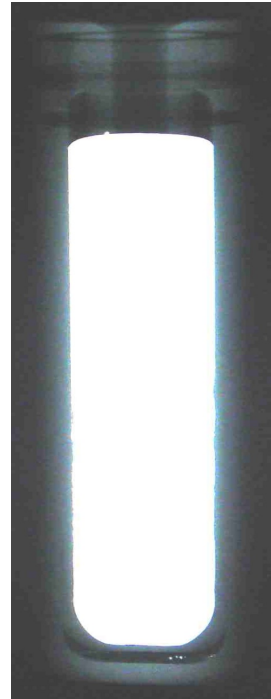
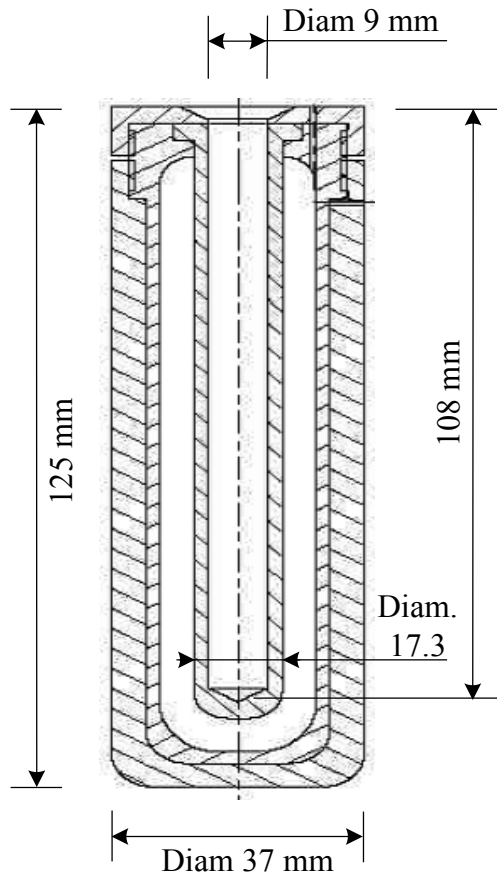
Pd-C →
1492 °C

Co-C →
1324 °C

Cu →
1084 °C



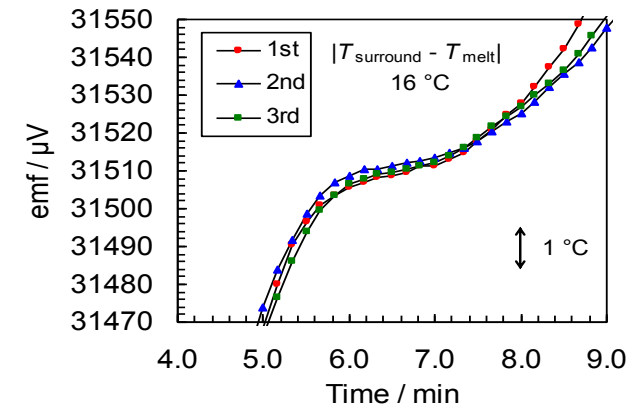
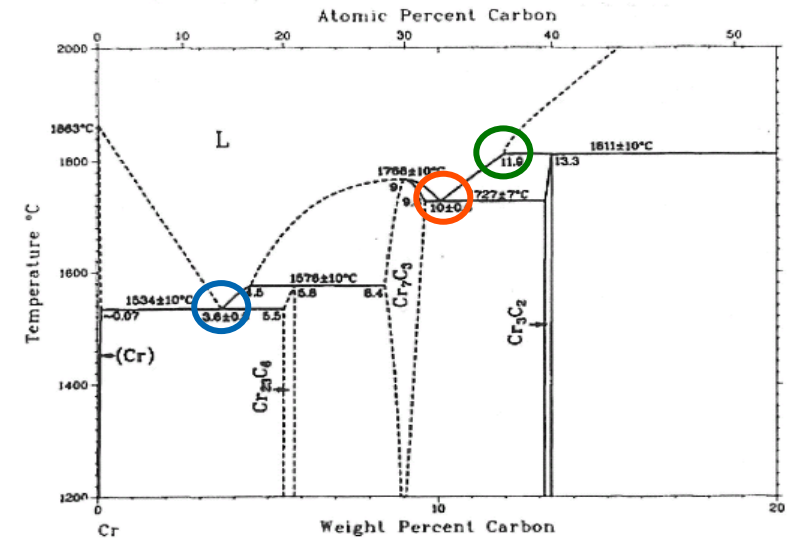
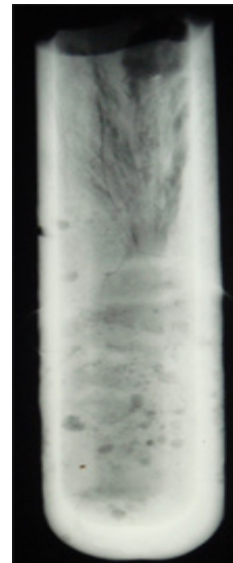
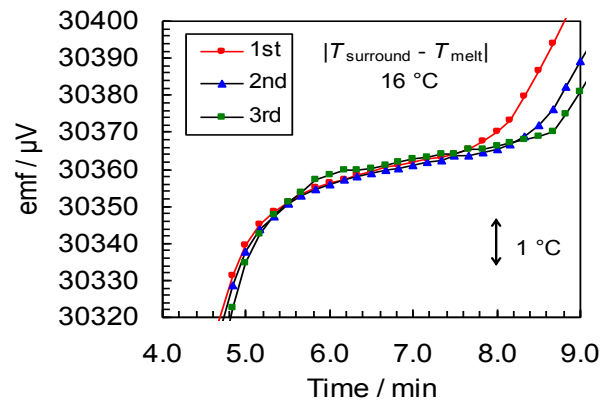
PFHT pour thermocouples jusqu' à 1500 °C



Cr-C eutectique + peritectique

- Moins onéreux que le Pt!
- 2 points fixes en 1
- premiers résultats au LNE-Cnam dès 2008

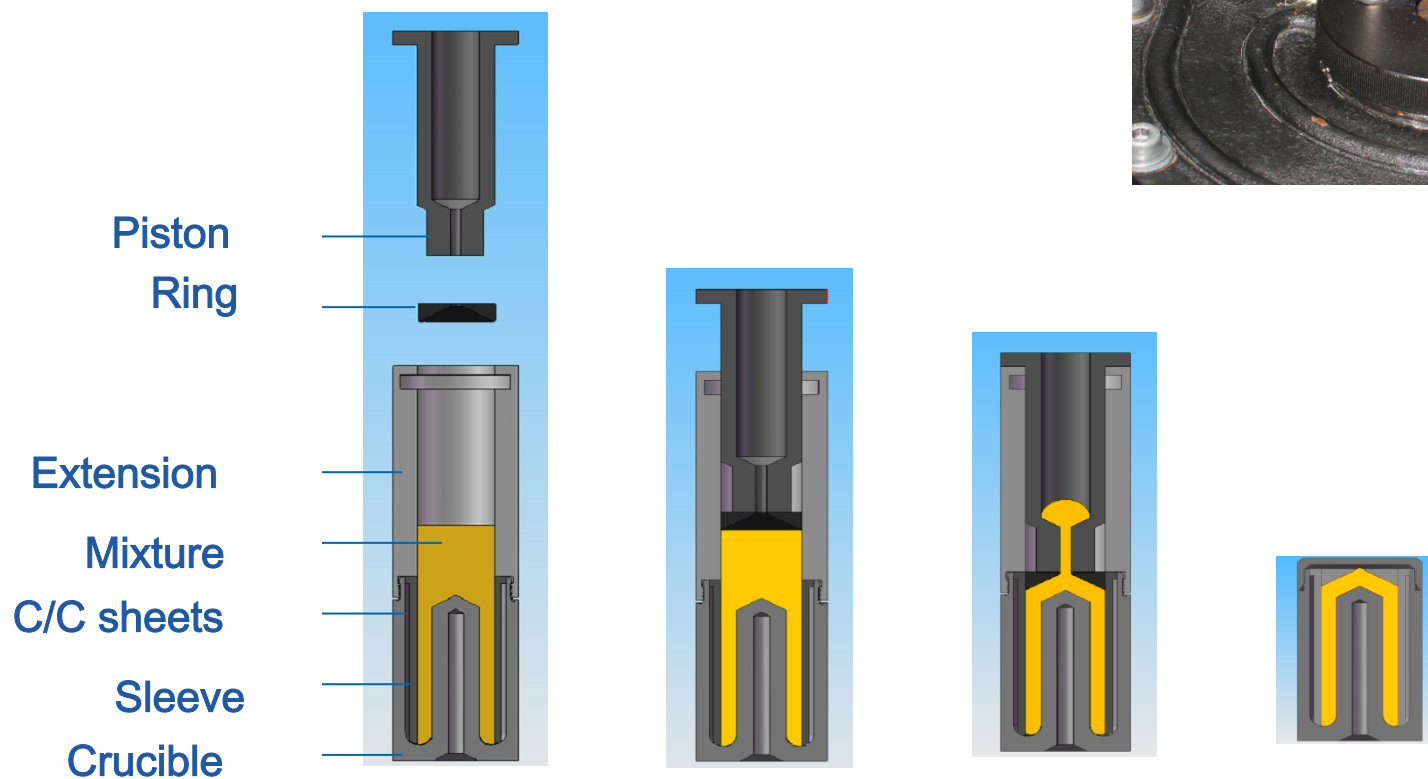
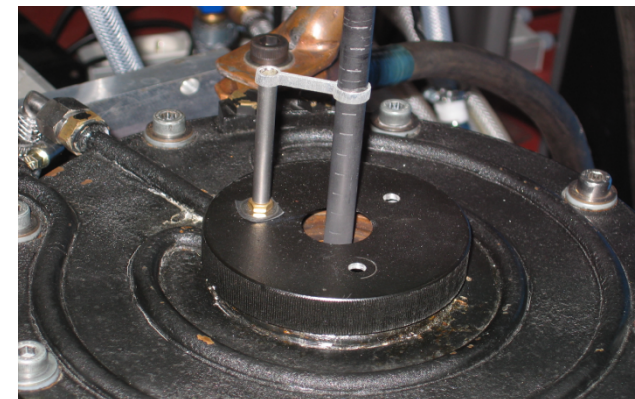
Eutectic Cr_7C_3 - Cr_3C_2 (1742°C)



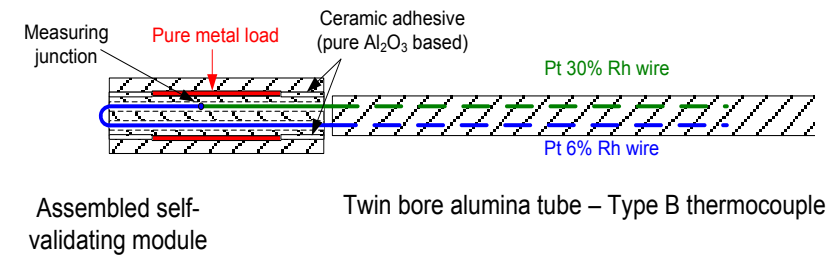
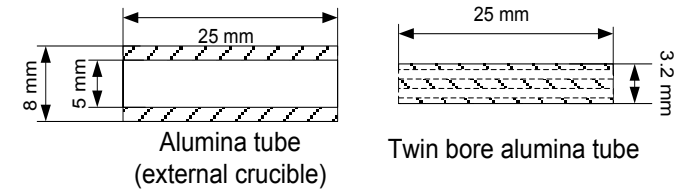
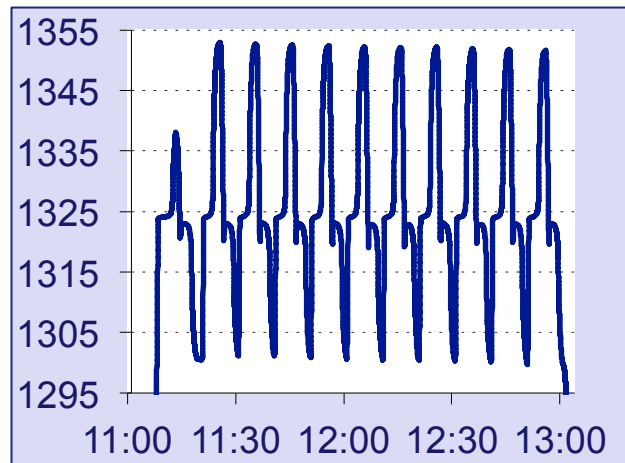
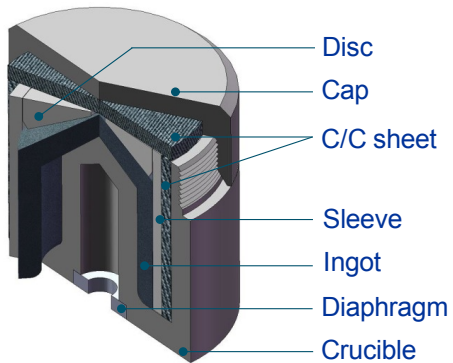
Peritectic Cr_3C_2 -C (1826°C)



Cellules PFHT pour la pyrométrie

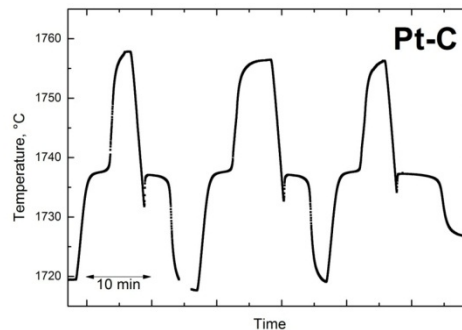
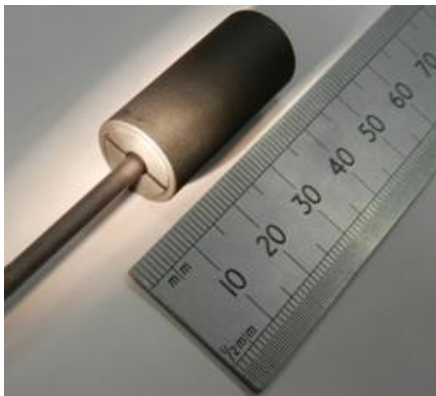


Amener la référence de température au cœur du processus



Modules d'auto-validation pour thermocouples (atmosphère oxydante)

Cellules pyrométriques robustes (CEA)



Cellules d'auto-validation pour thermocouples (atmosphère neutre)

Projets européens
MetroFission et [HiTeMS](#)



- ▶ Les mesures de température par rayonnement au meilleur niveau d'incertitudes requièrent une maîtrise des conditions expérimentales et la connaissance de l'émissivité.
- ▶ Les méthodes multispectrales peuvent permettre de s'affranchir de la connaissance de l'émissivité – à condition que certaines hypothèses soient remplies.
- ▶ Les thermocouples permettent une mesure ponctuelle, mais les inhomogénéités et les interactions physico-chimiques peuvent induire une dérive et un manque de fiabilité.

Correction de la dérive et de l'effet des hublots rendue possible grâce aux méthodes d'auto-validation : points fixes au plus près du processus !



Les études sont incluses dans les projets européens

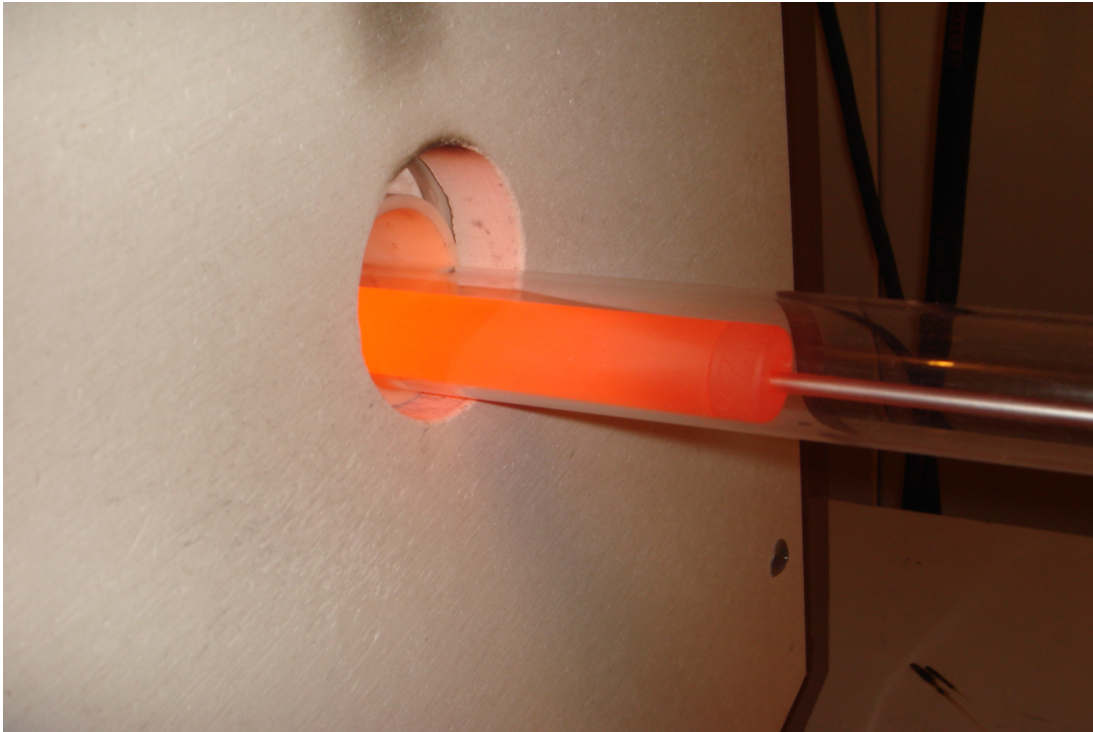
- ▶ Amélioration des références et température thermodynamique (InK)
- ▶ Diminution des incertitudes en optimisant la dissémination des références (NOTED)
- ▶ Solutions pour l'industrie – traçabilité, contrôle et correction de la dérive de thermomètres (HiTeMS, MetroFission et prochains projets 2015-)

Nouveau cadre EMPIR impliquant des laboratoires universitaires.

Idées de besoins industriels liés à la mesure de température ?



Merci pour votre attention !



mohamed.sadli@cnam.fr

