

Métrologie à très haute température (1300-2500°C) en pyroréfectométrie pour des applications nucléaires

Benjamin TURQUAIS^{1,3}, Jean-Louis SANS², Laurent DAVOUST³, Jules DELACROIX¹, Christophe JOURNEAU¹, Pascal PILUSO¹, Nourdine CHIKHI⁴

1 CEA, DES, IRESNE, DTN, Cadarache F-13108 Saint-Paul-Lez-Durance, France

2 Laboratoire PROMES-CNRS, 7 rue du four solaire, 66120 Font-Romeu Odeillo (France)

3 Grenoble-INP/Université Grenoble Alpes/CNRS, Laboratoire SIMaP, EPM Group, 38402 Saint Martin d'Hères, France

4 CEA, DES, IRESNE, DEC, Cadarache F-13108 Saint-Paul-Lez-Durance, France

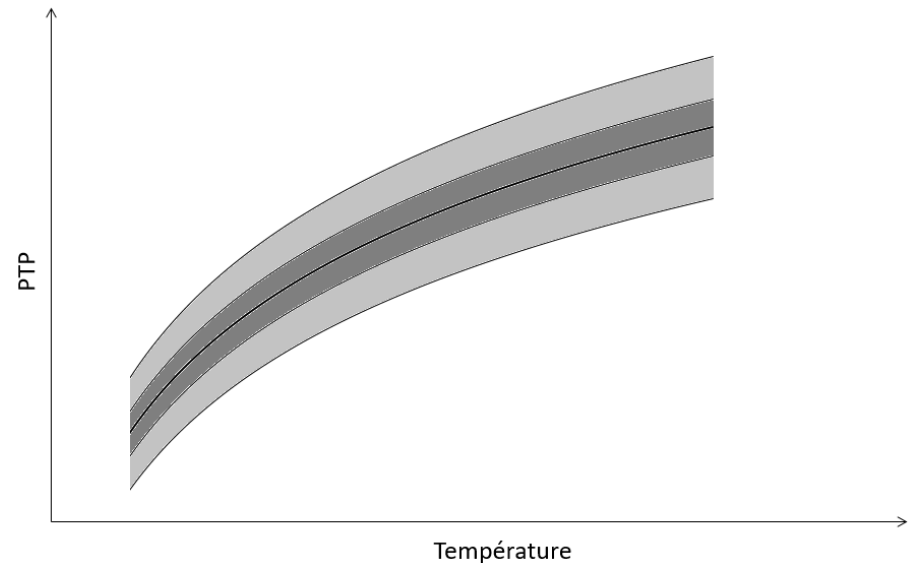


Introduction et contexte

Accidents graves : besoin de propriétés thermophysiques (PTP)
à l'état liquide et à très haute température ($T > 2000\text{K}$)

But :

Réduire les incertitudes sur
la température



Théorie du rayonnement et de la pyrométrie

Loi de Planck

$$L(T, \lambda) = \epsilon_{\lambda} \cdot \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1}$$

Mesuré

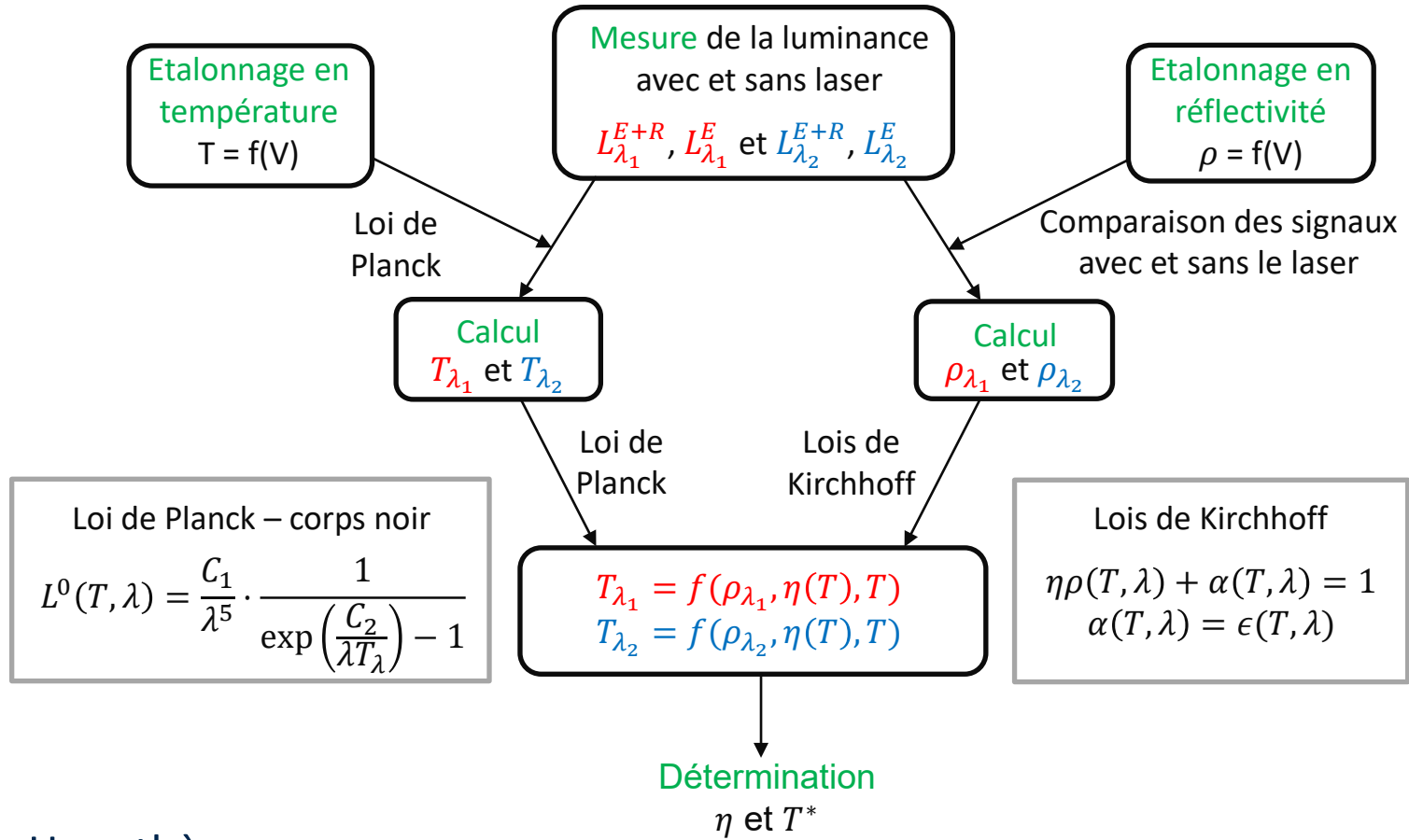
Connu

Inconnu

Hypothèses sur l'émissivité :

- $\epsilon_{\lambda} = 1$, température monochromatique T_{λ}
- $\epsilon_{\lambda_1} = \epsilon_{\lambda_2}$, température bichromatique T_c
- $\epsilon_{\lambda} = 1 - \eta\rho_{\lambda}$, mesure de la réflectivité directionnelle ρ_{λ} et estimation d'un facteur de diffusion η indépendant de la longueur d'onde

Théorie de la pyrroreflectométrie bichromatique



Hypothèses :

Corps opaque, facteur de diffusion η indépendant de la longueur d'onde

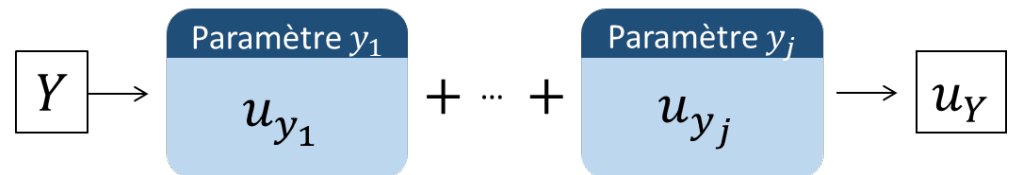


Méthode d'évaluation des incertitudes

Incertitude u_Y sur la grandeur Y

La grandeur Y dépend de plusieurs paramètres y_j d'incertitudes u_{y_j}

Somme quadratique :
$$u_Y^2 = \sum_j \left(\frac{\partial Y}{\partial y_j} \right)^2 u_{y_j}^2$$



Etalonnage en température :

Corrélation entre tous les points d'étalonnage x_i

Coefficients de sensibilité :
$$\frac{\partial Y}{\partial x_j} = f(x_1, \dots, x_n)$$

Evaluation des incertitudes en pyrométrie bichromatique

Incertainitude sur la température de la surface mesurée par un pyromètre bichromatique:

- Sur la mesure de la température bichromatique
- Sur l'émissivité de la surface
- Sur la transmission des hublots

$$\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_c}\right) \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right) = \frac{1}{C_2} \ln \left(\frac{\epsilon_{\lambda_1} \tau_{\lambda_1}}{\epsilon_{\lambda_2} \tau_{\lambda_2}} \right)$$

T_c → $u_{\text{constructeur}}$ + $u_{\text{émissivité}}$ + $u_{\text{transmission}}$ → u_{T_c}

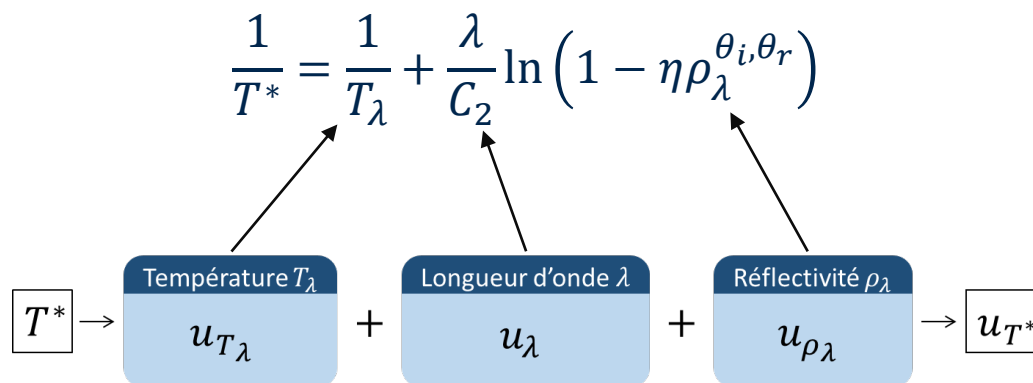
Evaluation des incertitudes en pyrорéfectométrie

Température monochromatique T_λ :

- Etalonnage (température, signal, émissivité de la cavité)
- Mesure du signal
- Interpolation par rapport au modèle
- Transmission d'éventuels hublots

Réflectivité ρ_λ :

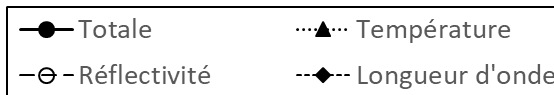
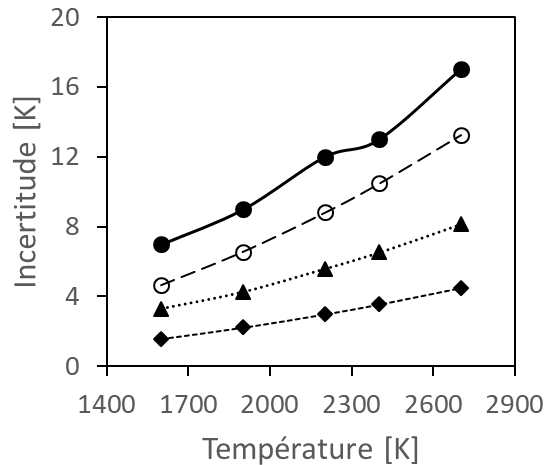
- Etalonnage
- Mesure



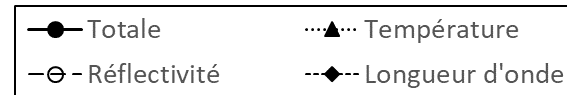
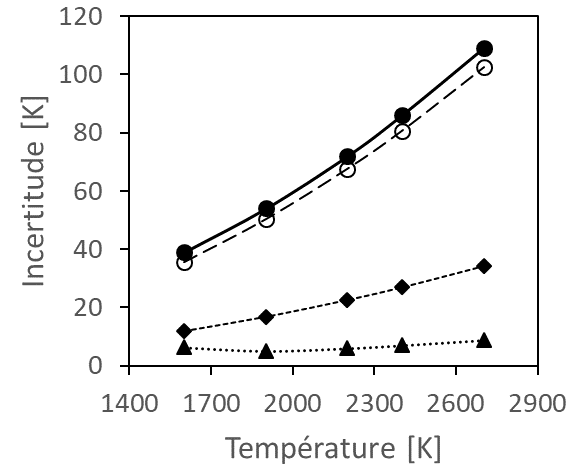
Incertitudes pyroréfectométriques :

Cas théorique – réflectivité faible vs élevée

Réflectivité faible ($0,02 \text{ sr}^{-1}$)



Réflectivité élevée (6 sr^{-1})



Prépondérance de l'incertitude sur la réflectivité

Sensibilité à l'étalonnage en température pour une faible réflectivité

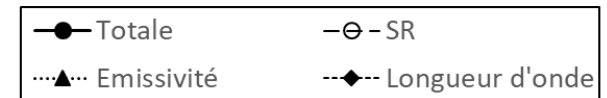
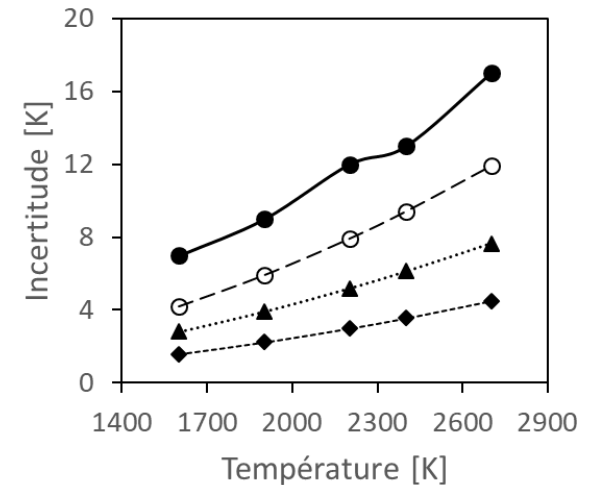
Incertitude en pyroréfectométrie limitée à 100K à 2700K

Incertitudes pyroréfectométriques détaillées :

Cas théorique – réflectivité faible

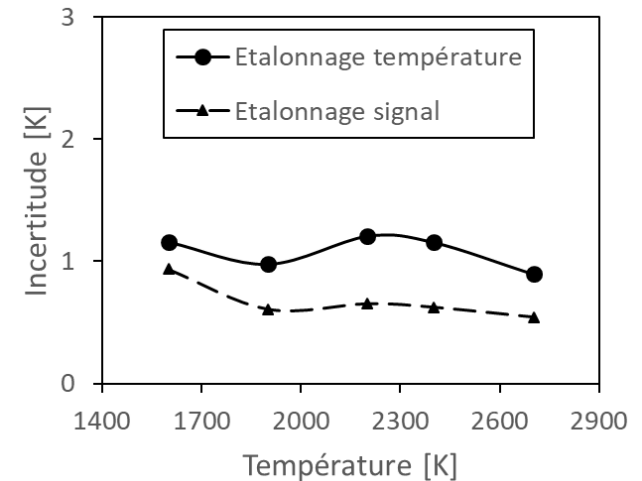
Sources d'incertitudes prépondérantes :

- Signal mesuré en réflectivité, SR
- Emissivité de la cavité de l'étalonnage
- Bande passante de la longueur d'onde



Sensibilité de l'étalonnage en température :

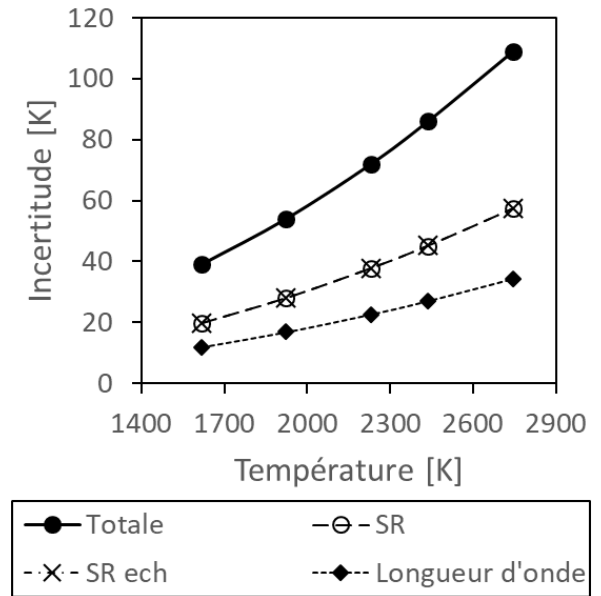
- Température de référence
- Signal mesuré



Incertitudes pyrорéfectométriques détaillées : Cas théorique – réflectivité élevée

Sources d'incertitudes prépondérantes :

- Signal mesuré en réflectivité, SR
- Signal de l'étalonnage en réflectivité sur le matériau, $SR\ ech$
- Bande passante de la longueur d'onde



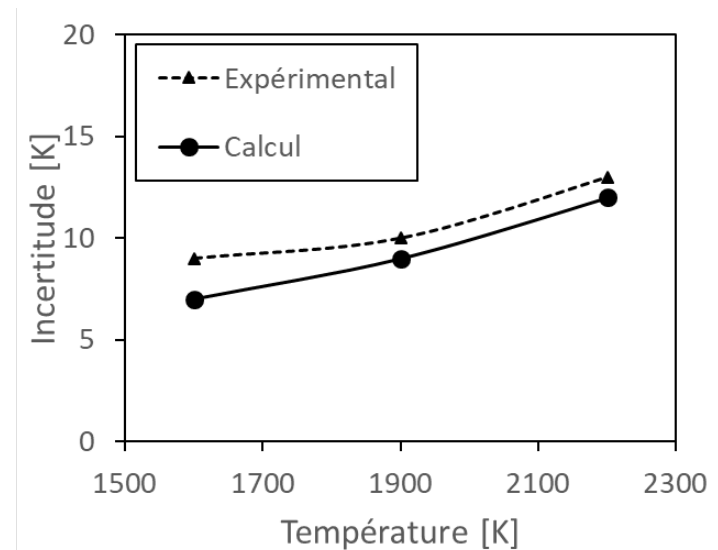
Incertitudes pyroréfectométriques :

Exemple expérimental

Chauffe d'un mélange eutectique (ruthénium-carbone) à 2450K dans un creuset en graphite

Calcul des incertitudes à partir des résultats expérimentaux

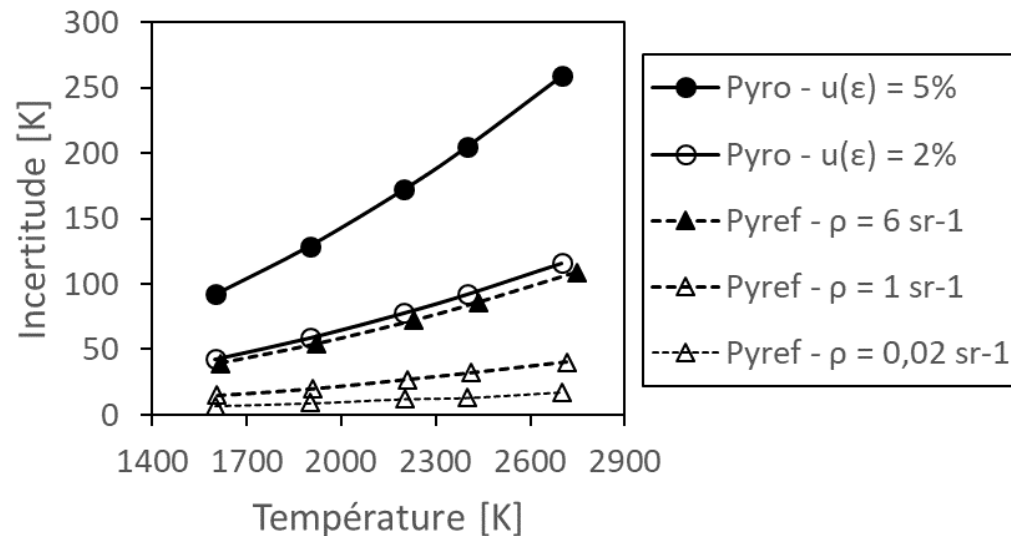
Mélange peu réflecteur (environ $0,05 \text{ sr}^{-1}$)



Comparaison pyroréfectométrie – pyrométrie bichromatique

Trois cas de réflectivités en pyroréfectométrie : 0,02 ; 1 ; 6 sr⁻¹

Deux cas en pyrométrie pour le ratio d'émissivités : 2% ; 5%



Incertitudes pyroréfectomètre < Incertitudes pyromètre bichromatique

Conclusion

- Méthode d'évaluation des incertitudes de mesures par pyroréfectométrie à très haute température
- Optimisation des mesures avec la correction des températures monochromatiques par les réflectivités
- Prépondérance des paramètres liés à la réflectivité dans l'évaluation de l'incertitude totale
- Matériaux à faibles réflectivités : prise en compte nécessaire de l'étalonnage en température
- Incertitude totale : 1 à 2% sauf pour des matériaux de réflectivités élevées / d'émissivités faibles