

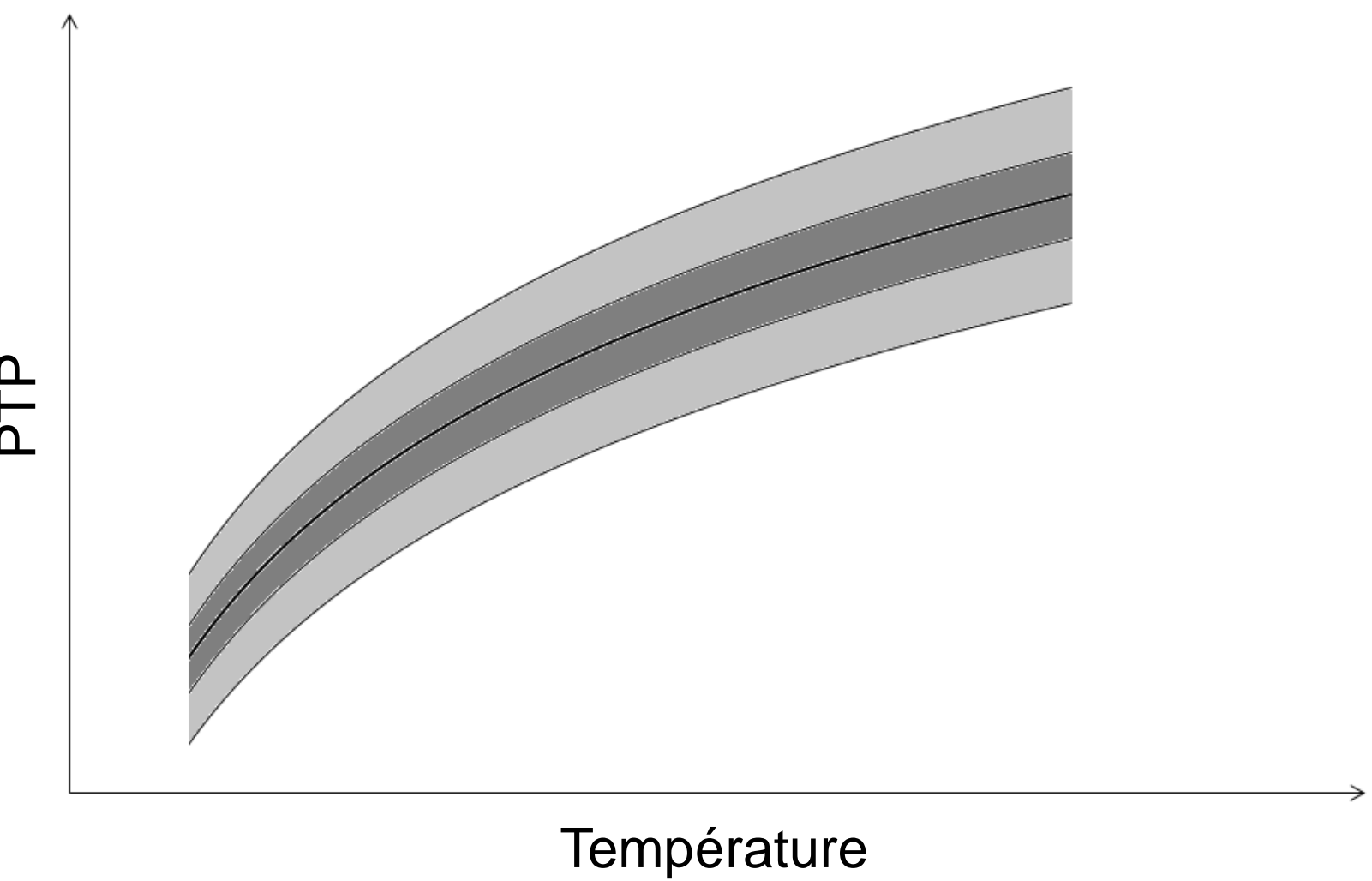
# Métrologie à très haute température (1300-2500°C) en pyroréfectométrie pour des applications nucléaires



Benjamin Turquais (1\*) & Jean-Louis Sans(2) & Laurent Davoust(3)

## Introduction et rayonnement

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



But : réduire les incertitudes de mesures sur la température

Un corps à une température  $T$  et d'émissivité  $\epsilon$  émet un rayonnement à toutes les longueurs d'onde, caractérisé par une luminance totale  $L(T)$  en  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ .

A une longueur d'onde  $\lambda$ , le rayonnement est caractérisé par une luminance spectrale  $L(T, \lambda)$  en  $\text{W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{sr}^{-1}$ .

Rayonnement à la longueur d'onde  $\lambda$  :

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

Mesuré  
Connu  
Inconnu

Pyrométrie bichromatique à  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  : détermination de  $T_c$

Hypothèse :  $\epsilon_{\lambda_1} = \epsilon_{\lambda_2} \rightarrow T = T_c$

## Incertitudes en pyroréfectométrie bichromatique

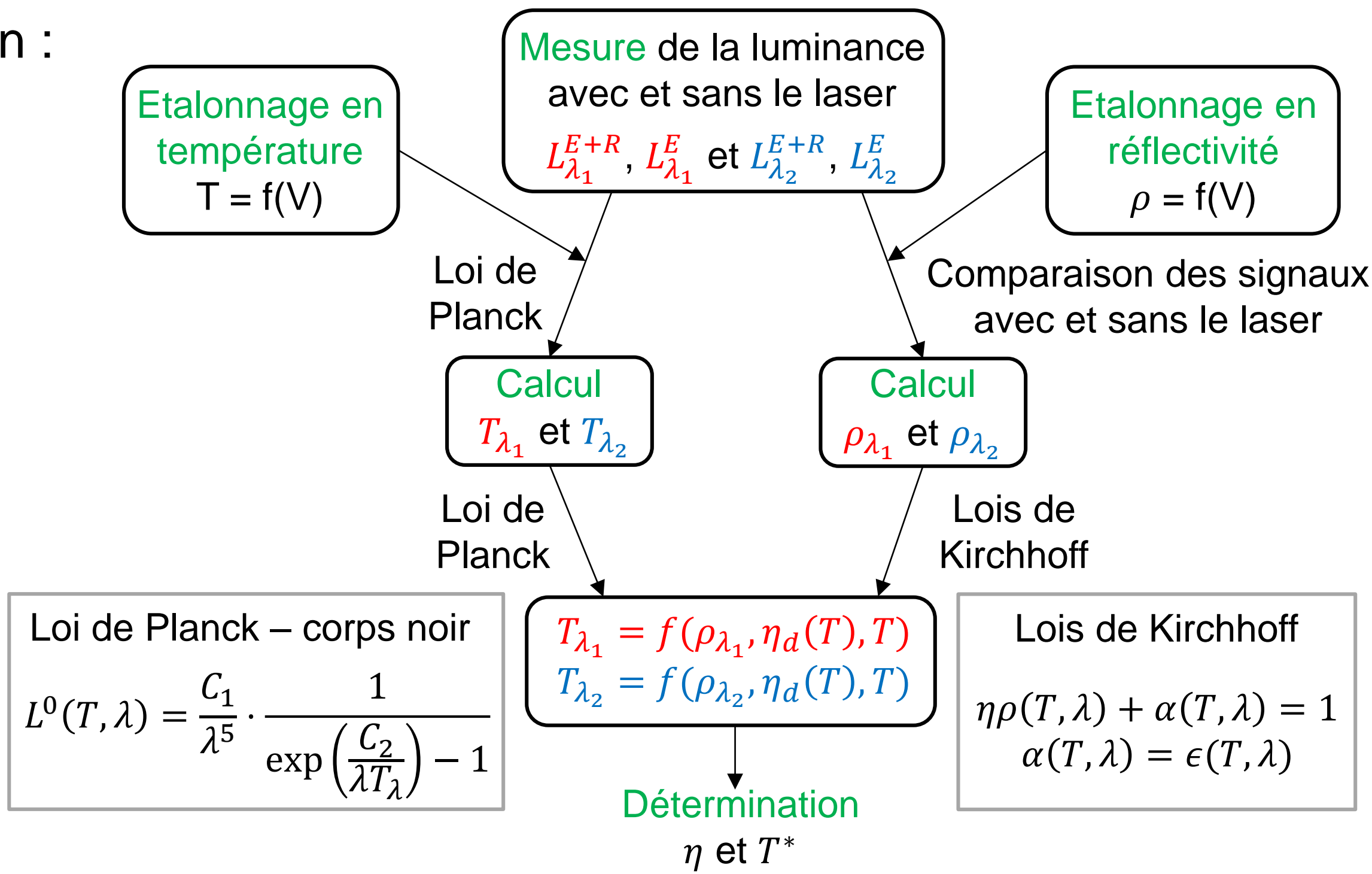
### Méthode de la pyroréfectométrie

Mesure de la température monochromatique  $T_\lambda$  et de la réflectivité  $\rho$  à deux longueurs d'onde  $\lambda$  (1,3  $\mu\text{m}$  et 1,55  $\mu\text{m}$ )

Facteur de diffusion :

$$\eta(T, \lambda) = \frac{\rho_\lambda^{\theta_i, \theta_r}}{\rho_\lambda^{\theta_i, \theta_r}}$$

- Hypothèses :
- Facteur de diffusion  $\eta_d$  indépendant de la longueur d'onde
  - Corps opaque



### Evaluation des incertitudes

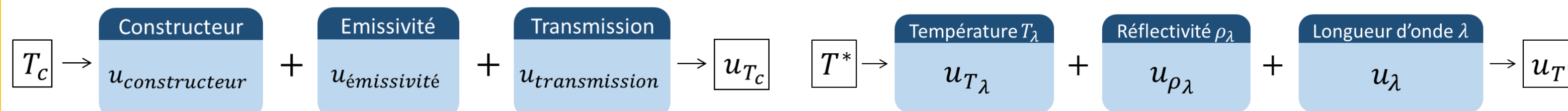
Grandeur  $Y$  d'incertitude  $u_Y$ , paramètres  $y_j$  d'incertitudes  $u_{y_j}$

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

Pyrométrie bichromatique :

- Mesure de la température bichromatique
- Emissivité de la surface
- Transmission des hublots

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



Pyroréfectométrie :

- Mesure de la température monochromatique  $T_\lambda$
- Mesure de la réflectivité  $\rho_\lambda$
- Longueur d'onde  $\lambda$

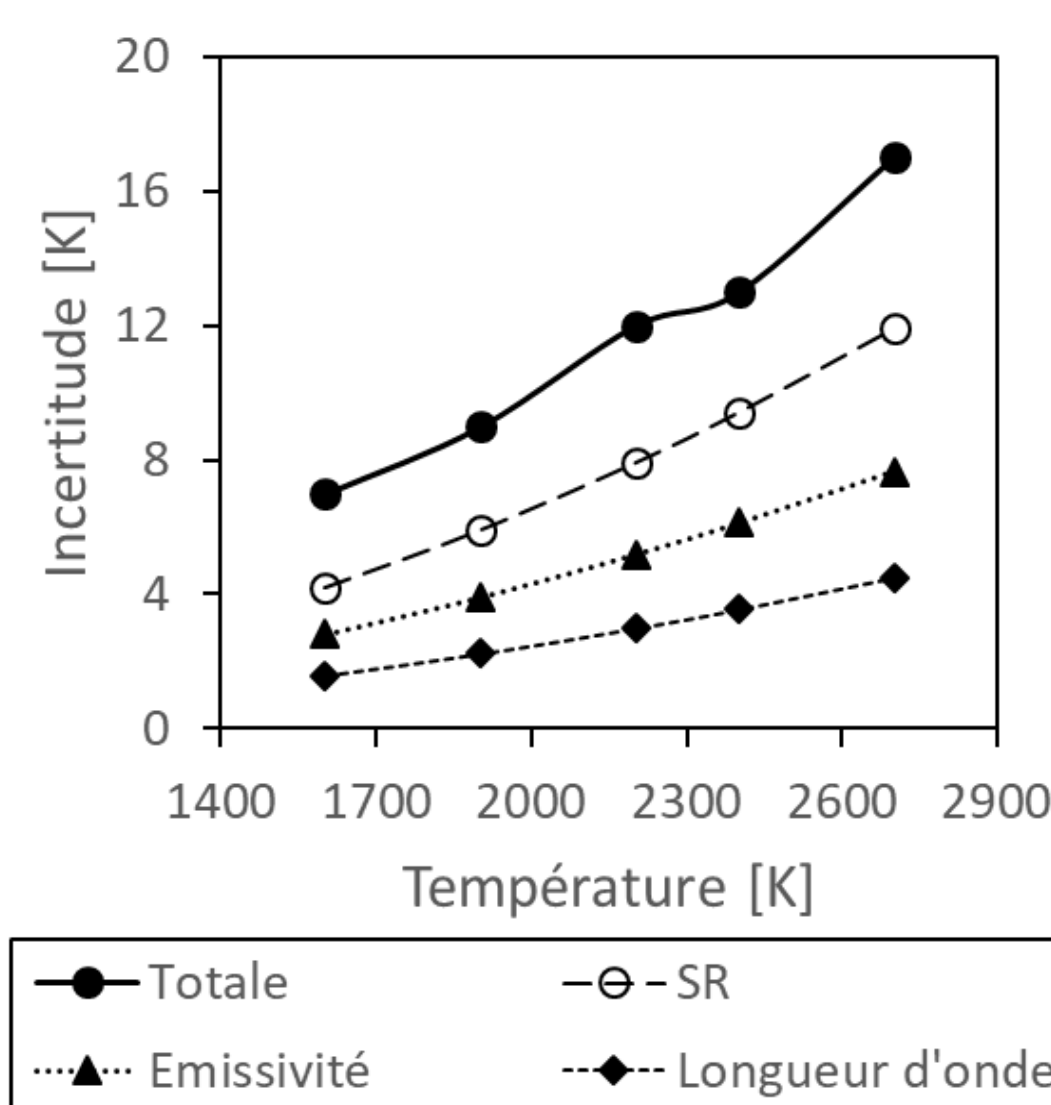
$$\frac{1}{T^*} = \frac{1}{T_\lambda} + \frac{\lambda}{C_2} \ln(1 - \eta \rho_\lambda^{\theta_i, \theta_r})$$

## Résultats et comparaison

### Réflectivité faible (0,02 sr<sup>-1</sup>) - cas théorique

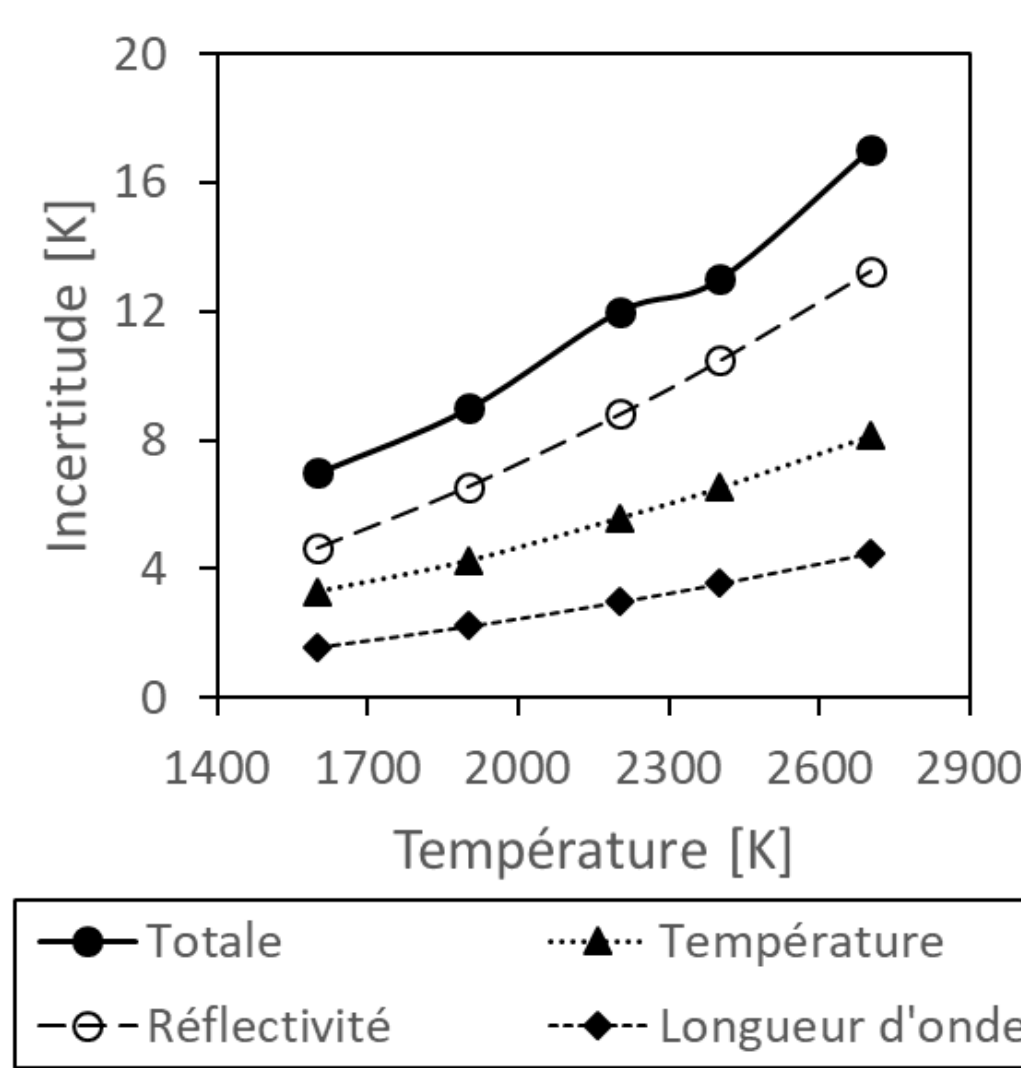
Sources d'incertitudes prépondérantes :

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

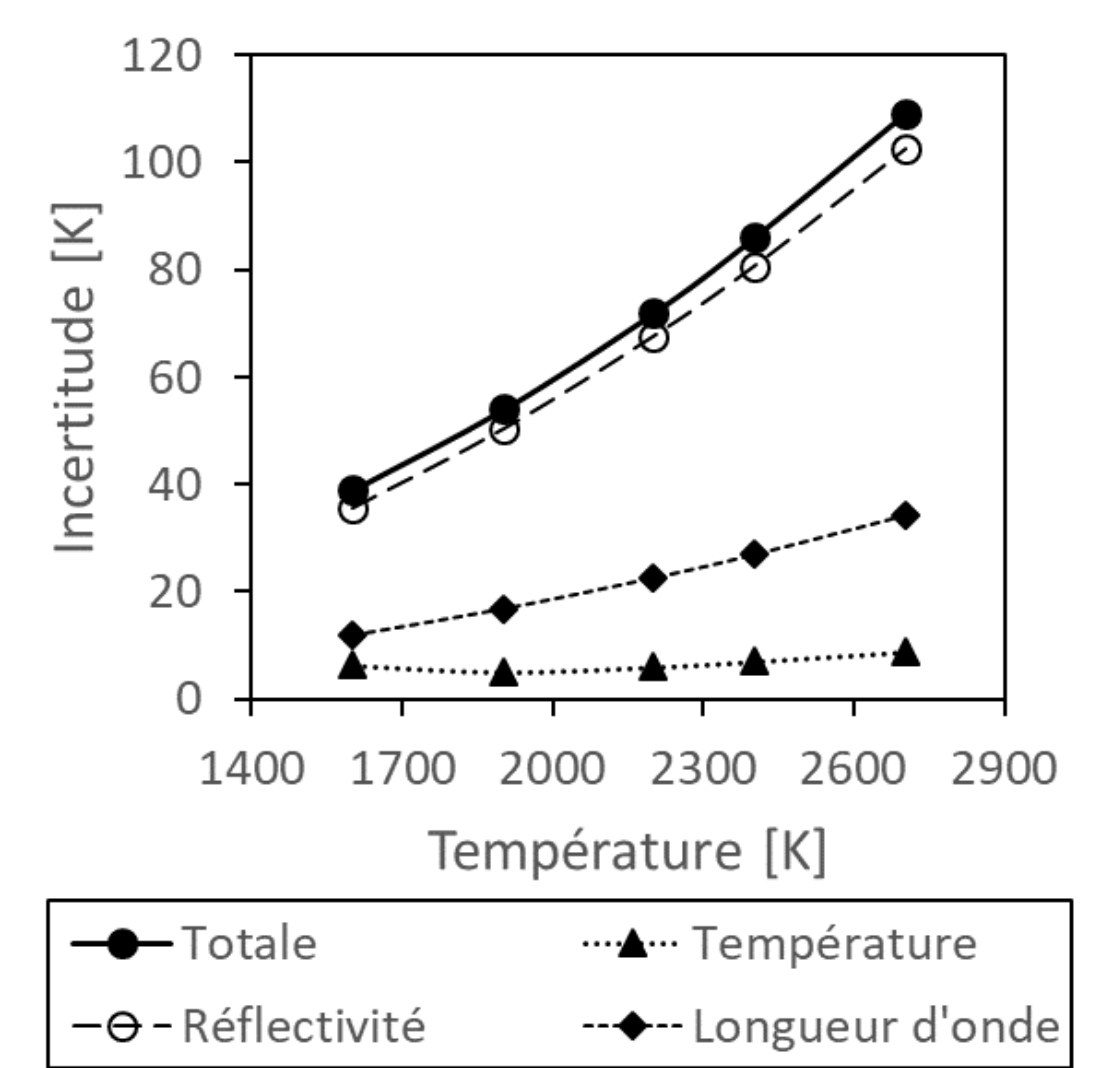


### Comparaison : réflectivité faible vs élevée

Réflectivité faible (0,02 sr<sup>-1</sup>)



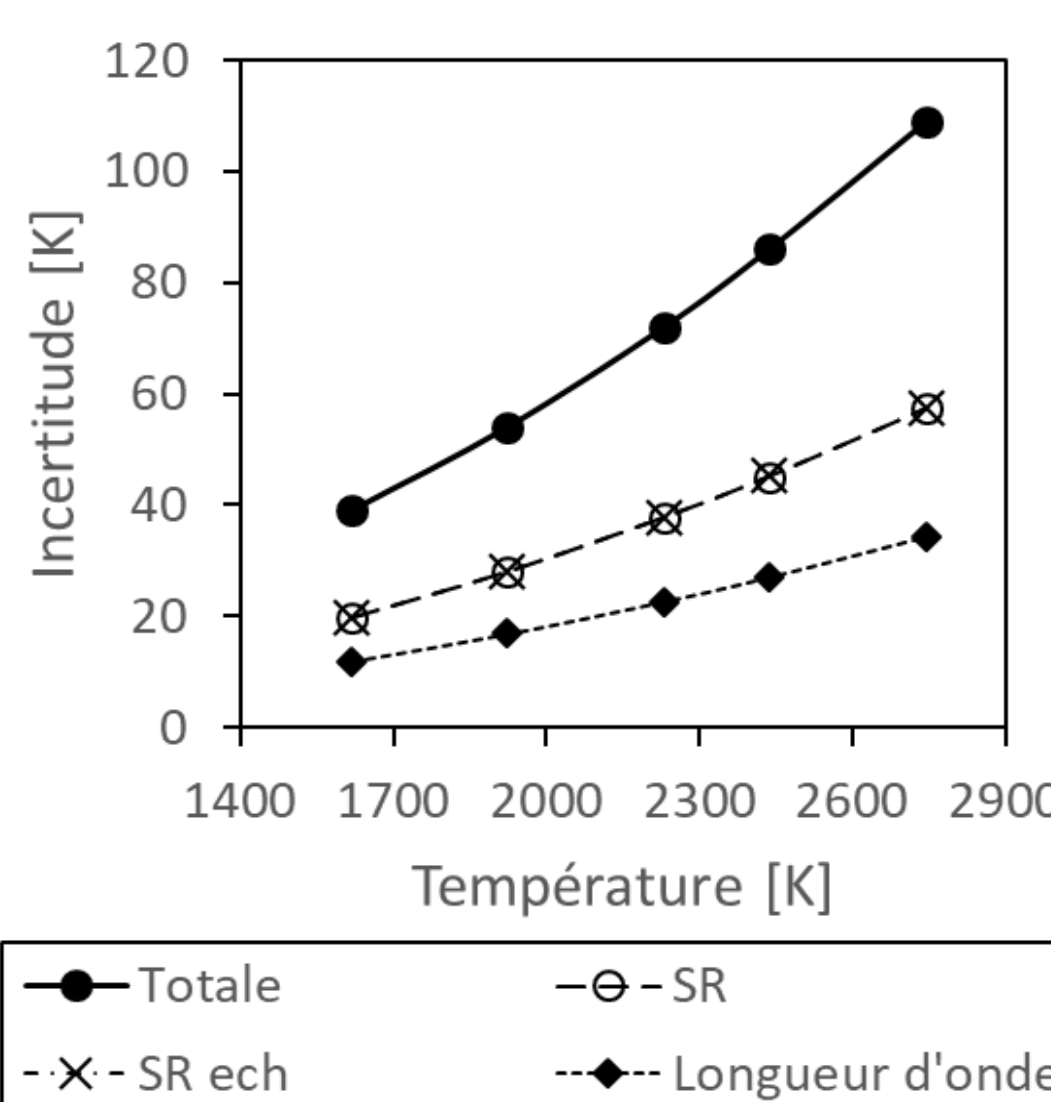
Réflectivité élevée (6 sr<sup>-1</sup>)



### Réflectivité élevée (6 sr<sup>-1</sup>) - cas théorique

Sources d'incertitudes prépondérantes :

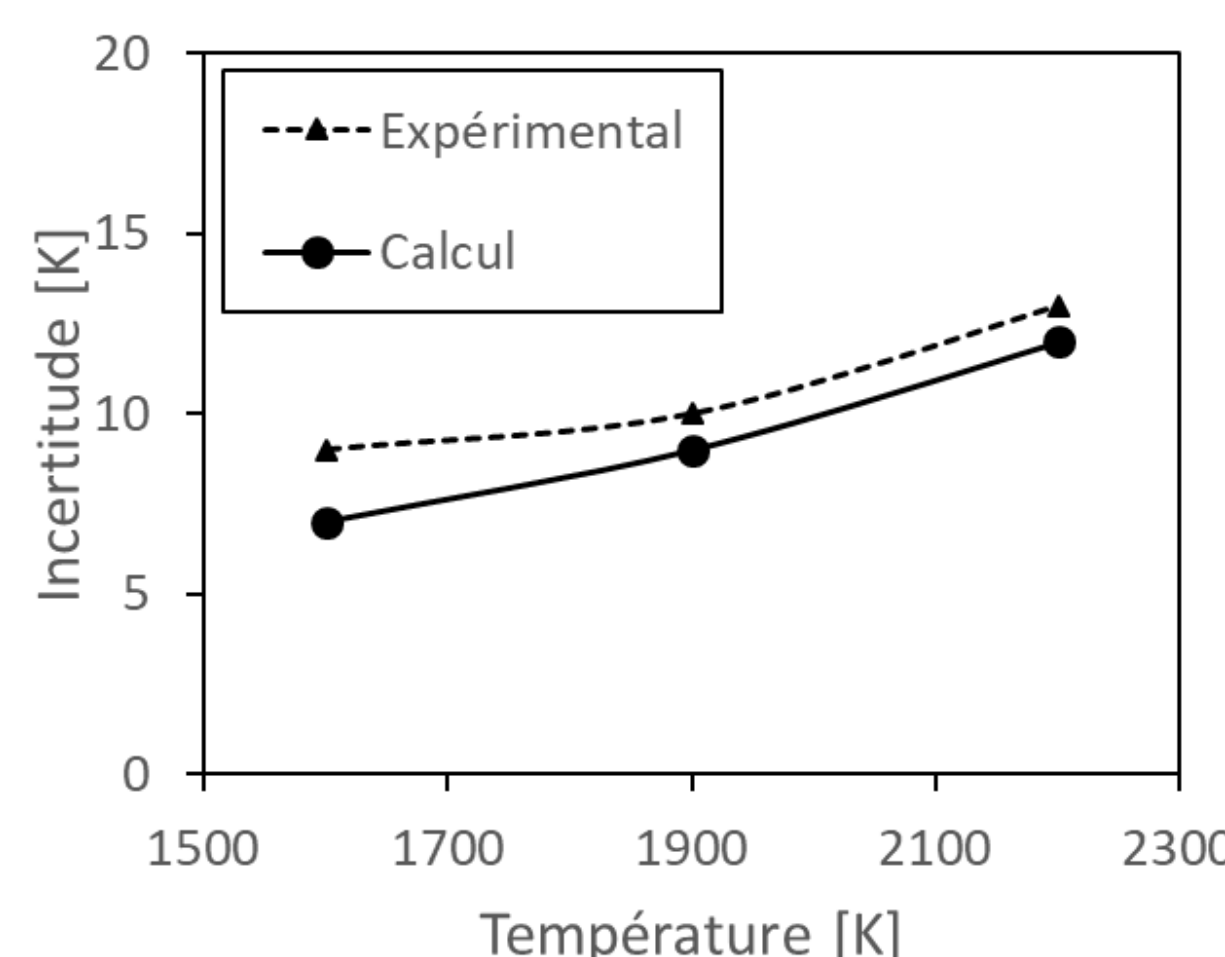
- Signal mesuré en réflectivité,  $SR$
- Signal de l'étalonnage en réflectivité sur le matériau,  $SR_{ech}$
- Bande passante de la longueur d'onde



- Prépondérance de l'incertitude sur la réflectivité (étalonnage + mesure)
- Sensibilité à l'étalonnage en température pour les réflectivités faibles (maximale à 2200 K)
- Incertitude en pyroréfectométrie limitée à 100K à 2700K

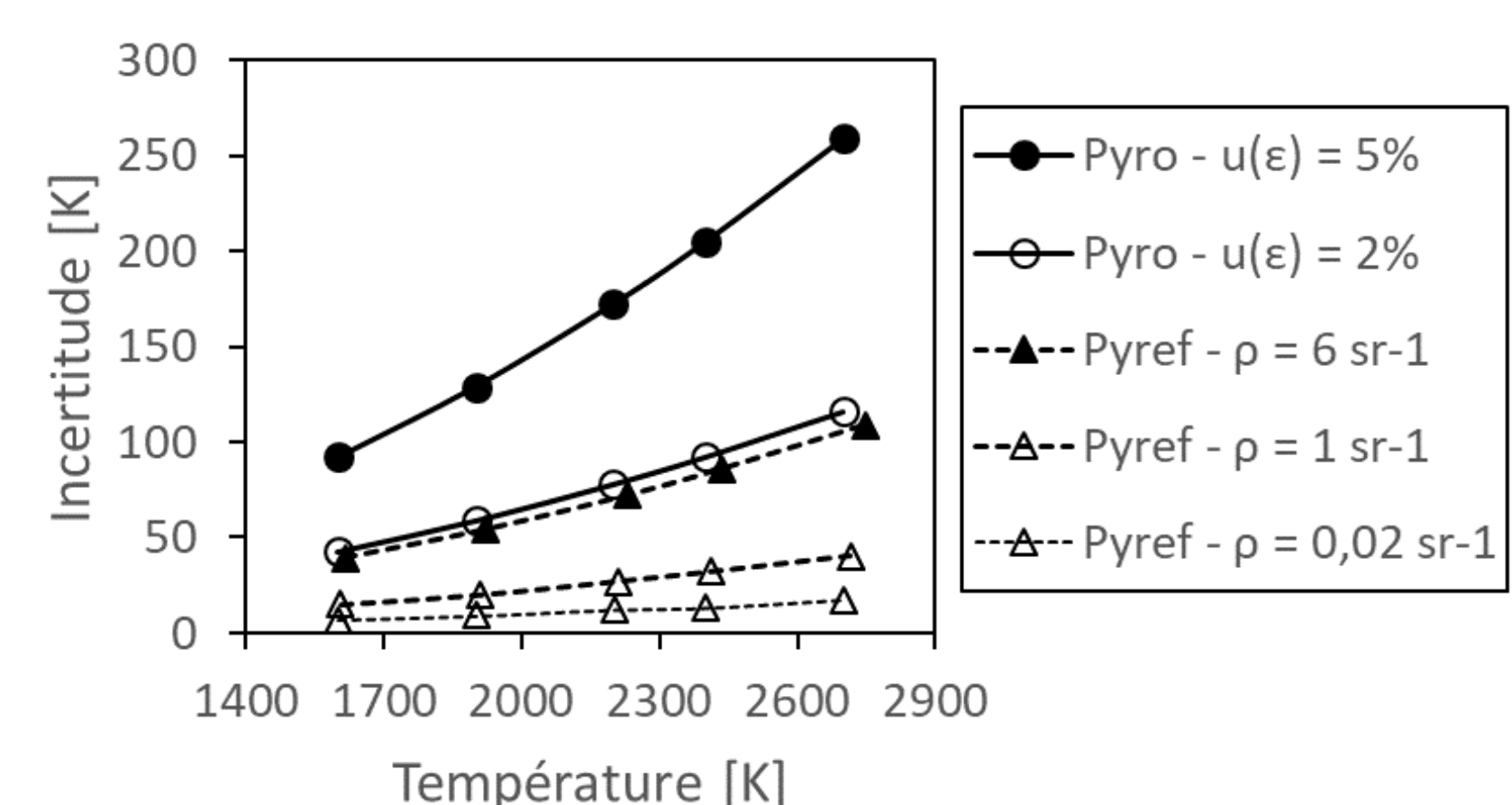
### Résultats expérimentaux

- Mélange eutectique ruthénium – carbone dans un creuset en graphite
- Chauffe à 2450 K
- Calcul des incertitudes à partir des résultats expérimentaux
- Mélange peu réflecteur (environ 0,05 sr<sup>-1</sup>)



### Comparaison pyroréfectométrie – pyrométrie bichromatique

- Trois cas de réflectivités en pyroréfectométrie : 0,02 ; 1 ; 6 sr<sup>-1</sup>
- Deux cas en pyrométrie pour le ratio d'émissivités : 2% ; 5%



Incertitudes pyroréfectomètre < Incertitudes pyromètre bichromatique

(\*) Auteur correspondant (benjamin.turquais2@cea.fr)

(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