

Les mesures de température par voie optique

Daniel Hernandez
Thierry Sentenac
Agnès Delmas
Jacques Jay
Benjamin Rémy
Domingos De Sousa Meneses

PROMES Odeillo
LAAS Toulouse
CETHIL Villeurbanne
CETHIL Villeurbanne
LEMETA Nancy
CEMHTI Orléans

- la pyroréfectométrie (PROMES, LAAS),
- la pyrométrie multi-spectrale (CETHIL),
- la pyrométrie dans l'UV (LEMETA).
- la pyrométrie au point de Christiansen (CEMHTI-CESTA),

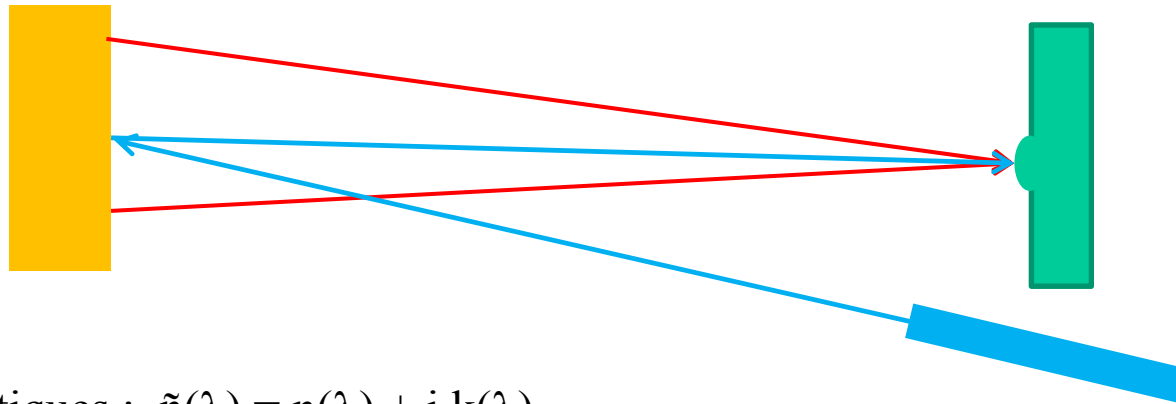




Pyrométrie :

une source/une cible

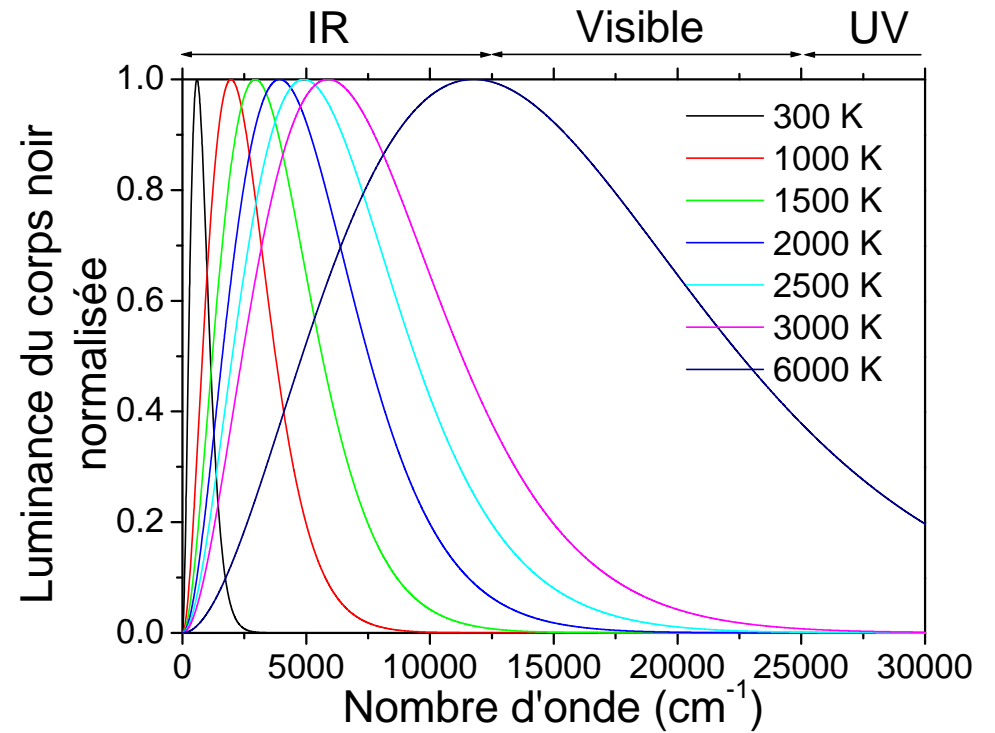
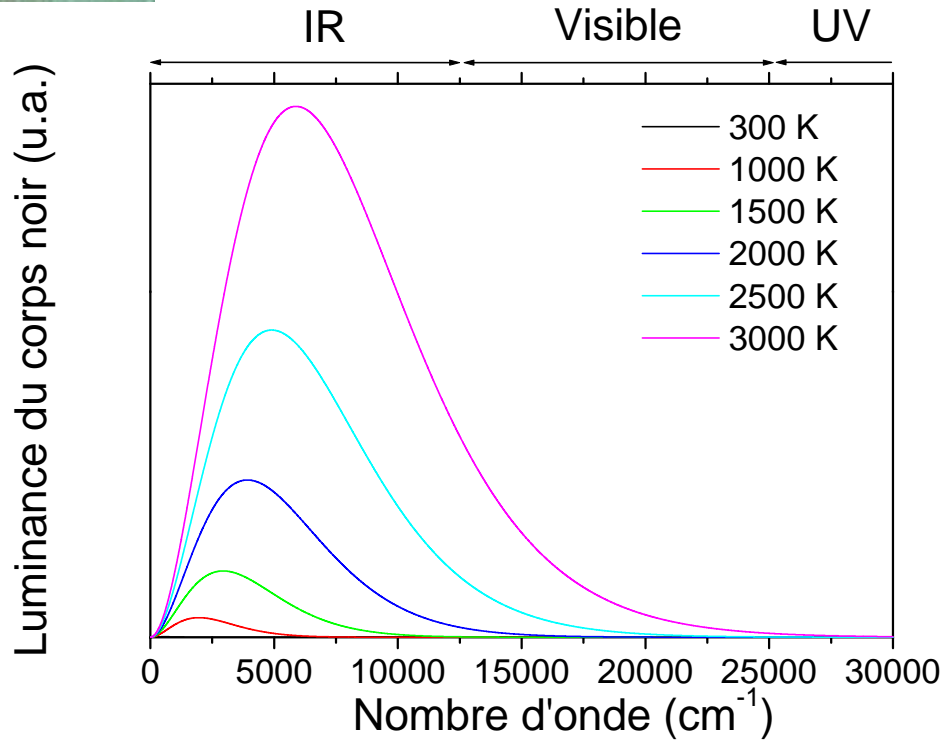
un dispositif de mesure



- Des propriétés optiques : $\tilde{n}(\lambda) = n(\lambda) + i k(\lambda)$
- $\rho, \tau, \alpha, \varepsilon, K$
- Une épaisseur
- Une texture
- Un environnement

- Optique
- Electronique
- Une méthodologie
- Une référence (étalonnage)

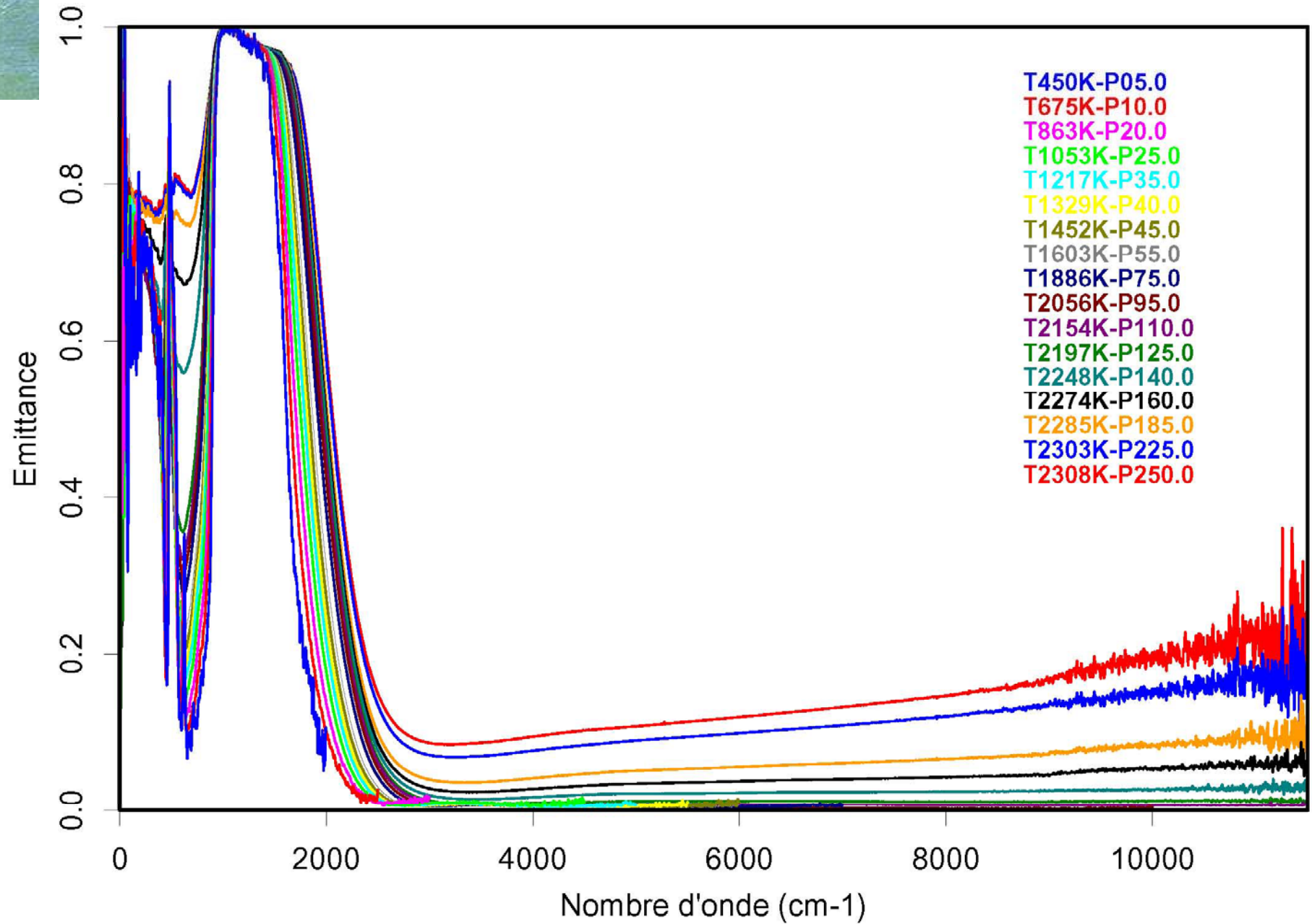
Mesure précise de la Température

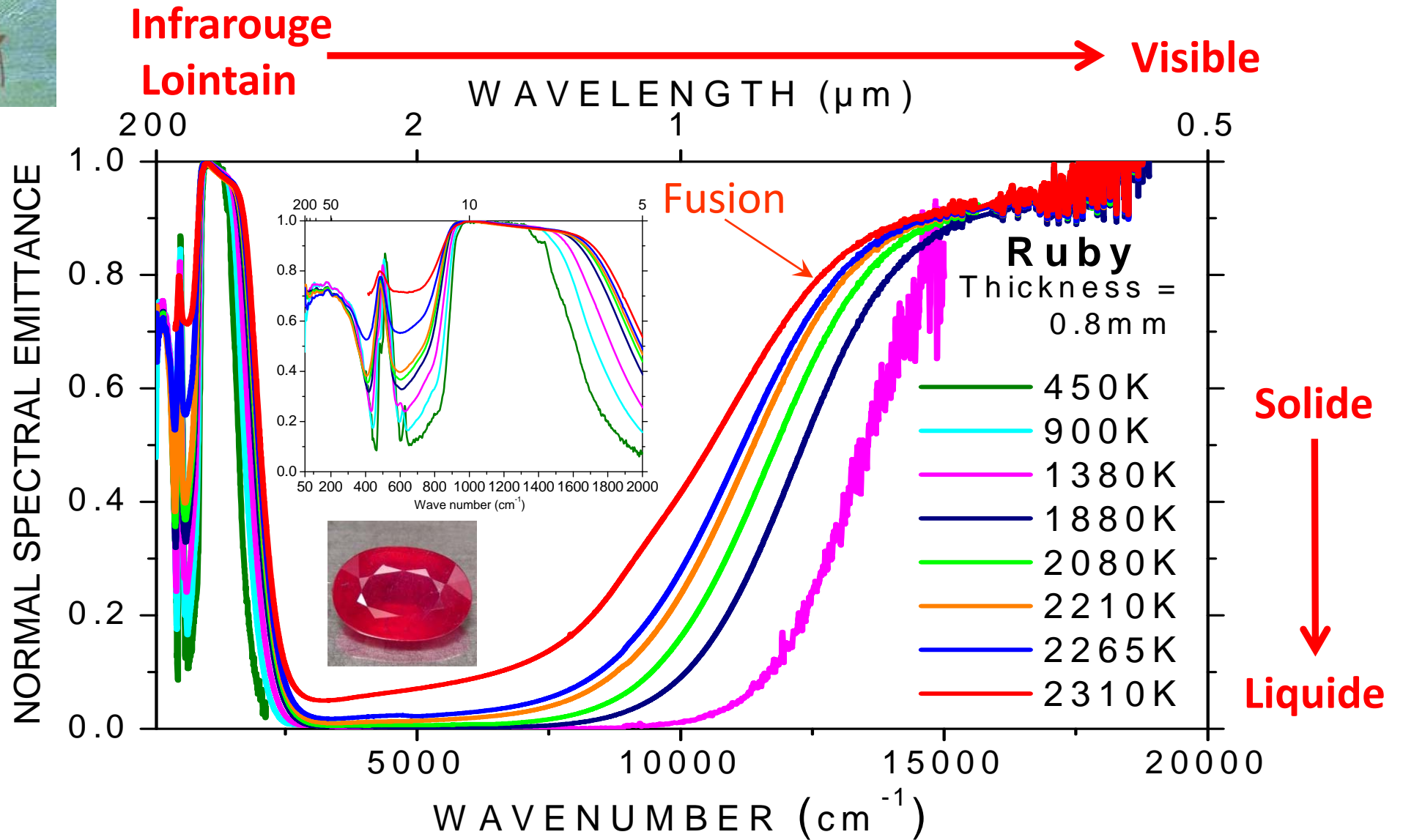


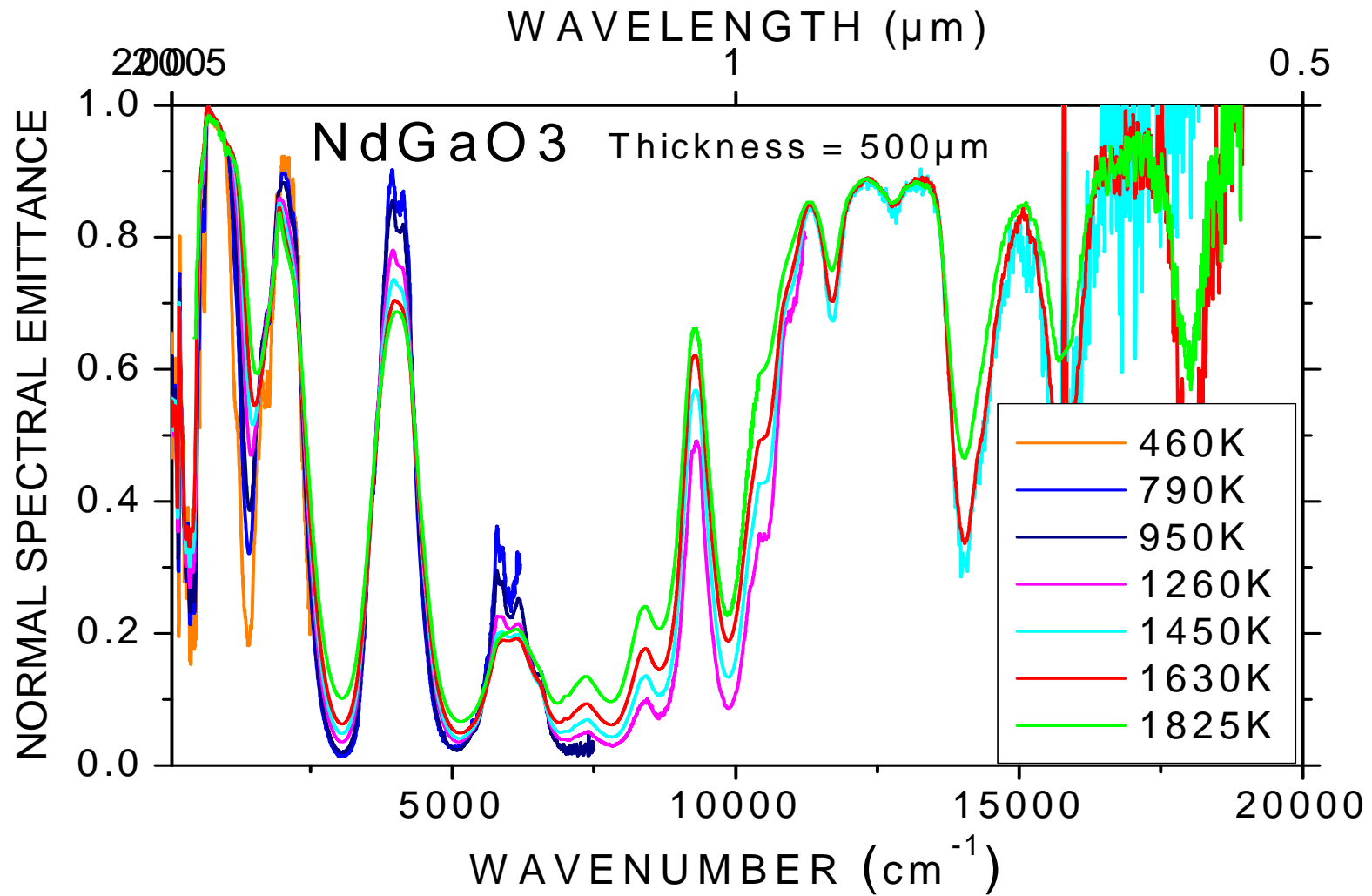
On n'a pas toujours des corps noir à mesurer.....



Al_2O_3

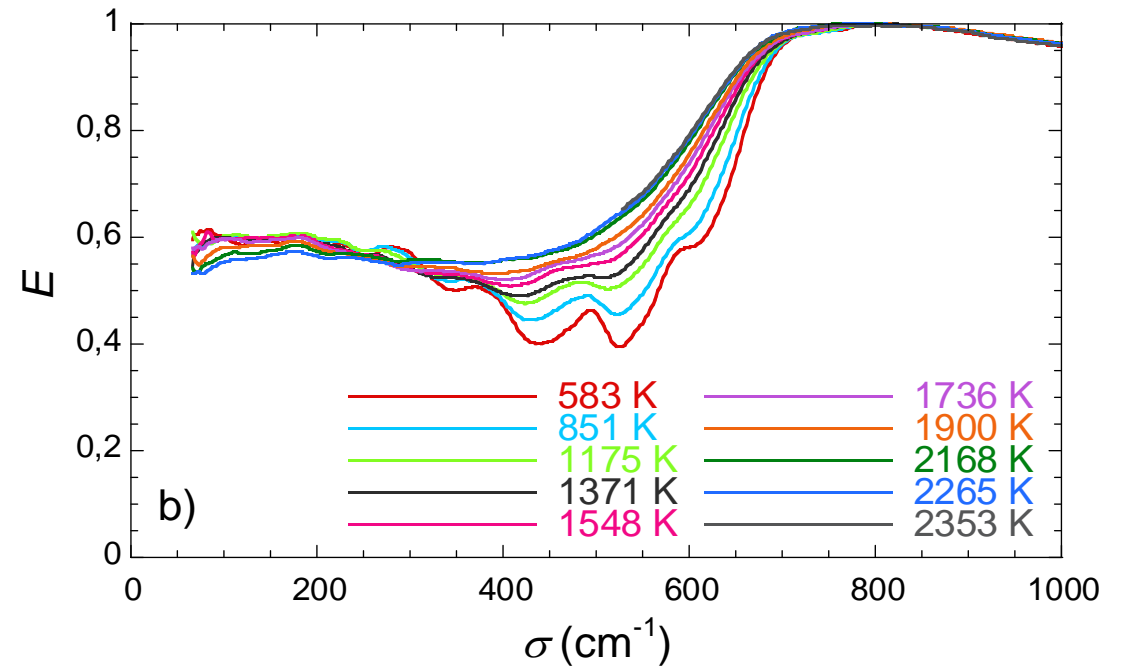
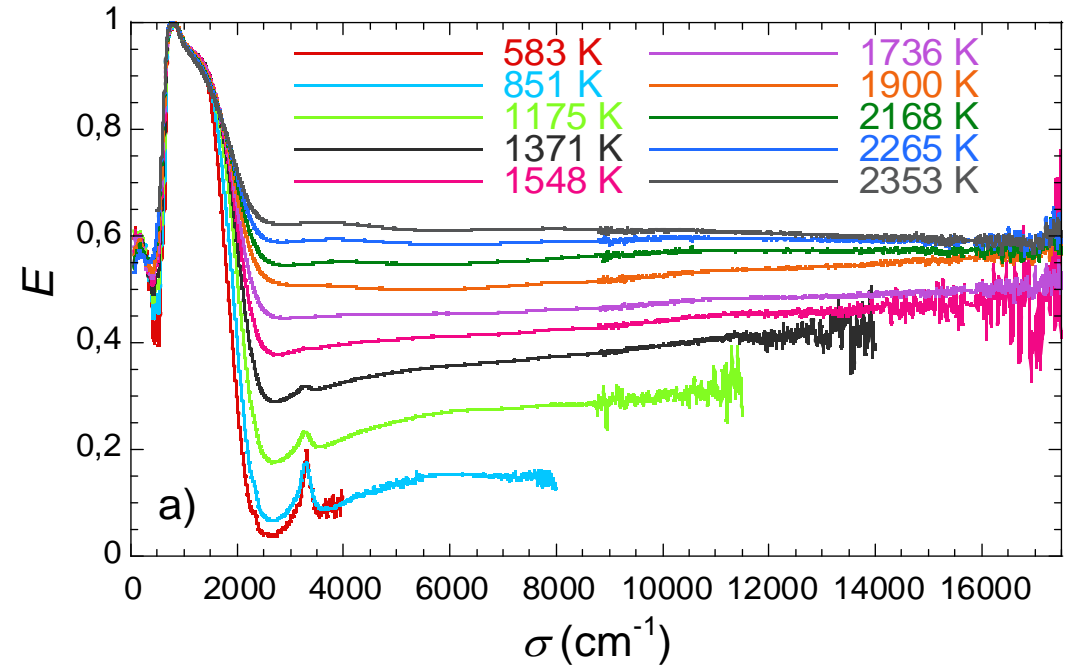
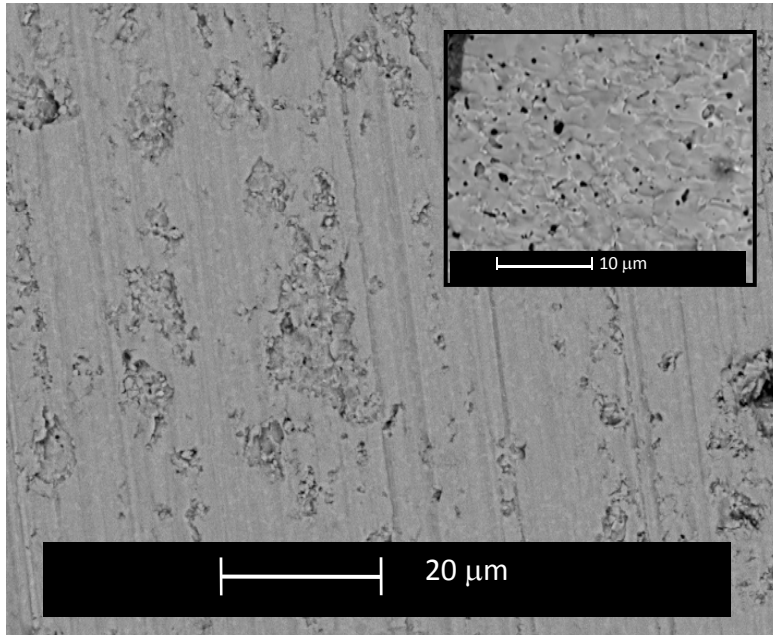








HfO_2 (8% Y_2O_3)





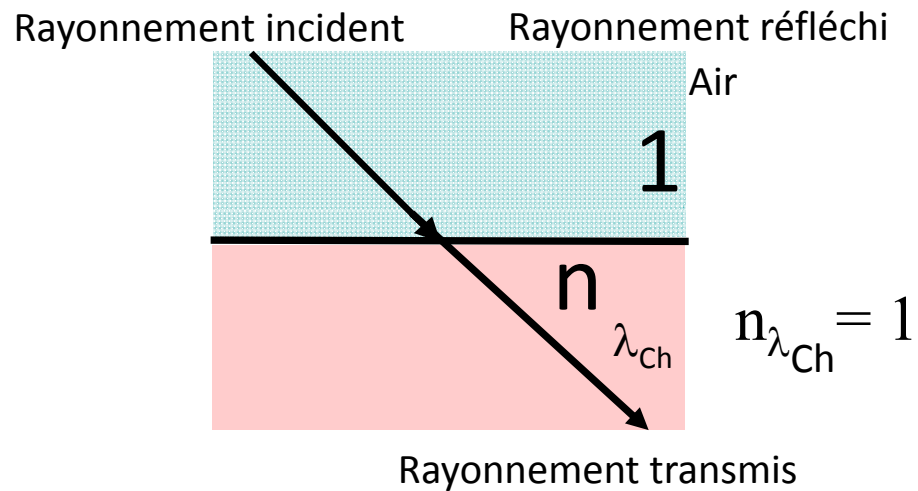
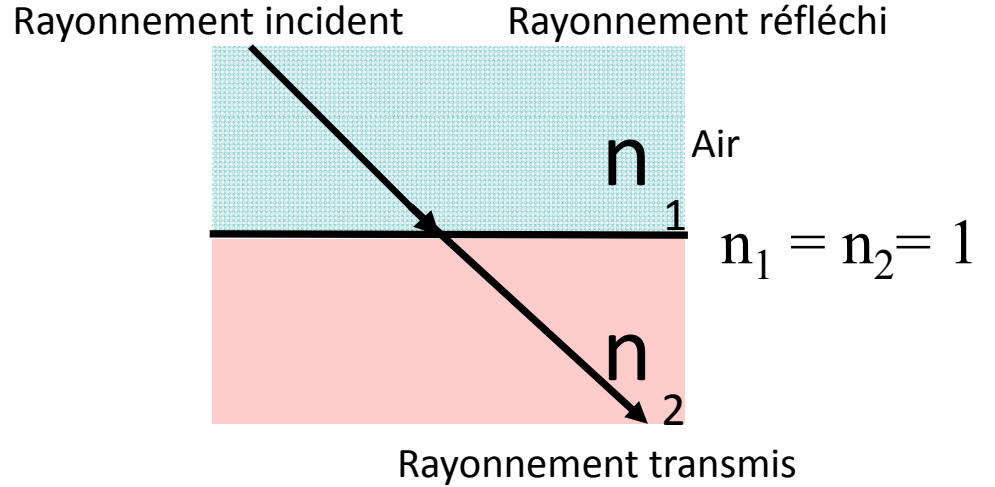
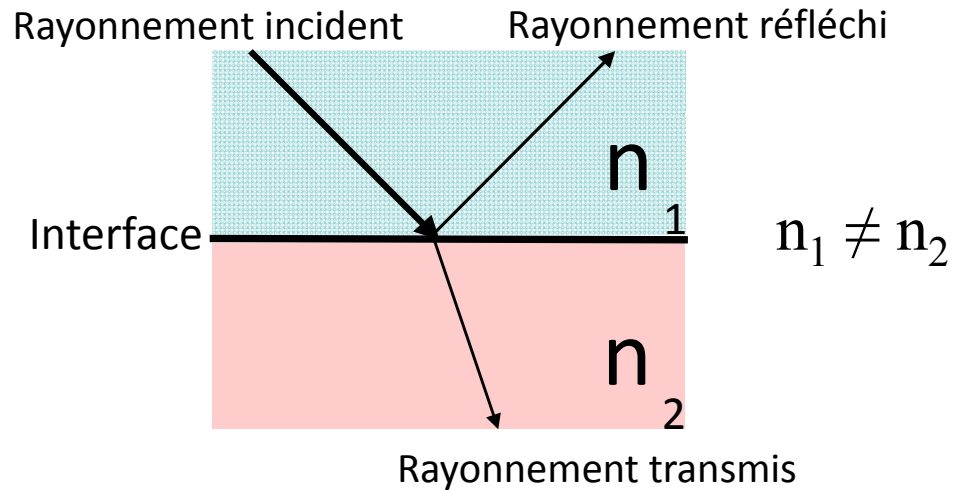
Pas de technique universelle :

Complémentarité des méthodes

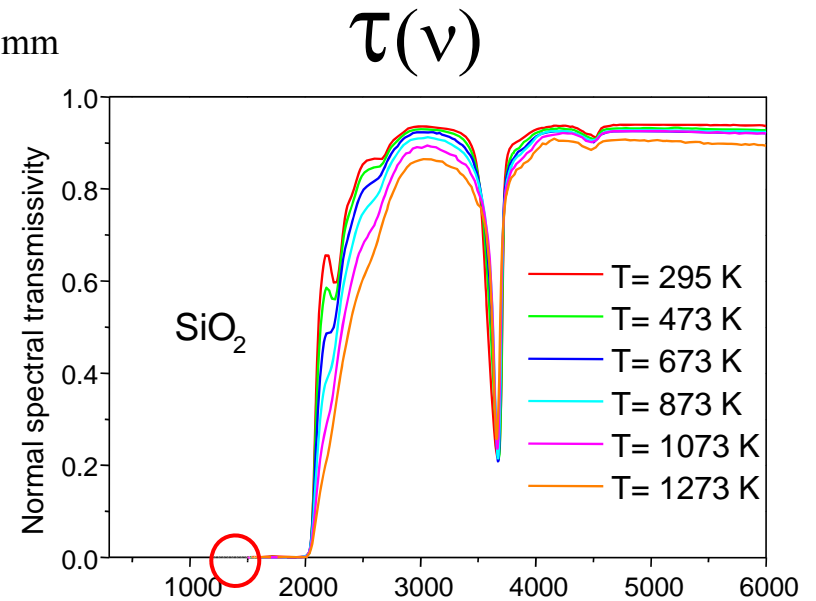
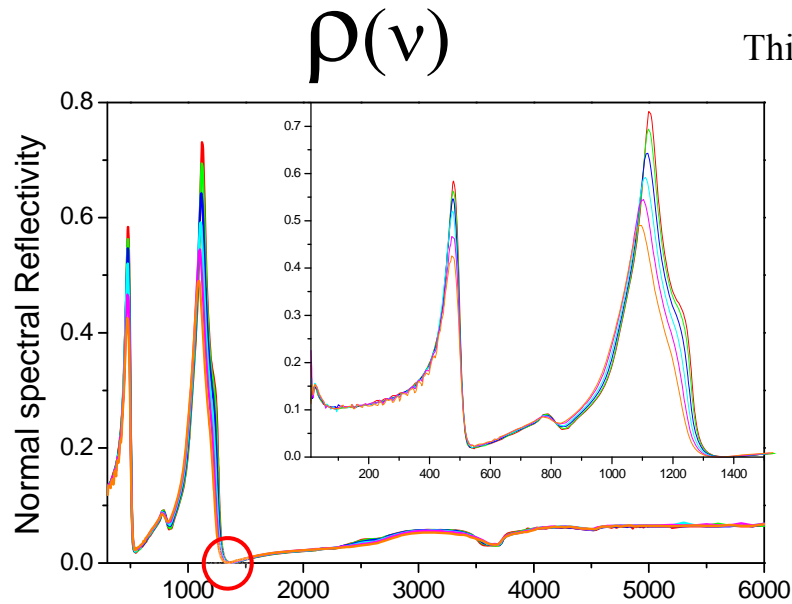
- Milieux opaques
- Milieux semi-transparents
- Niveau de température
- Forme des objets
- Accessibilité des objets

La Pyrométrie au point de Christiansen

La longueur d'onde de Christiansen



La longueur d'onde de Christiansen



○ Christiansen
Nombre d'onde

$$R(\sigma_{Chris}, T) = \frac{(n_{\sigma_{Chris}} - 1)^2 + k_{\sigma_{Chris}}^2}{(n_{\sigma_{Chris}} + 1)^2 + k_{\sigma_{Chris}}^2} \approx 0$$

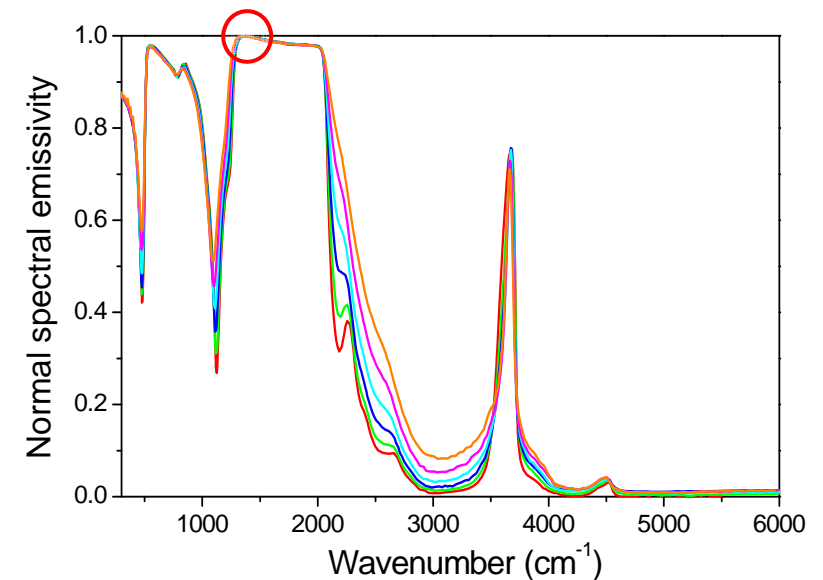
$$n_{Chris} = 1$$

$$k_{Chris} \ll 1$$

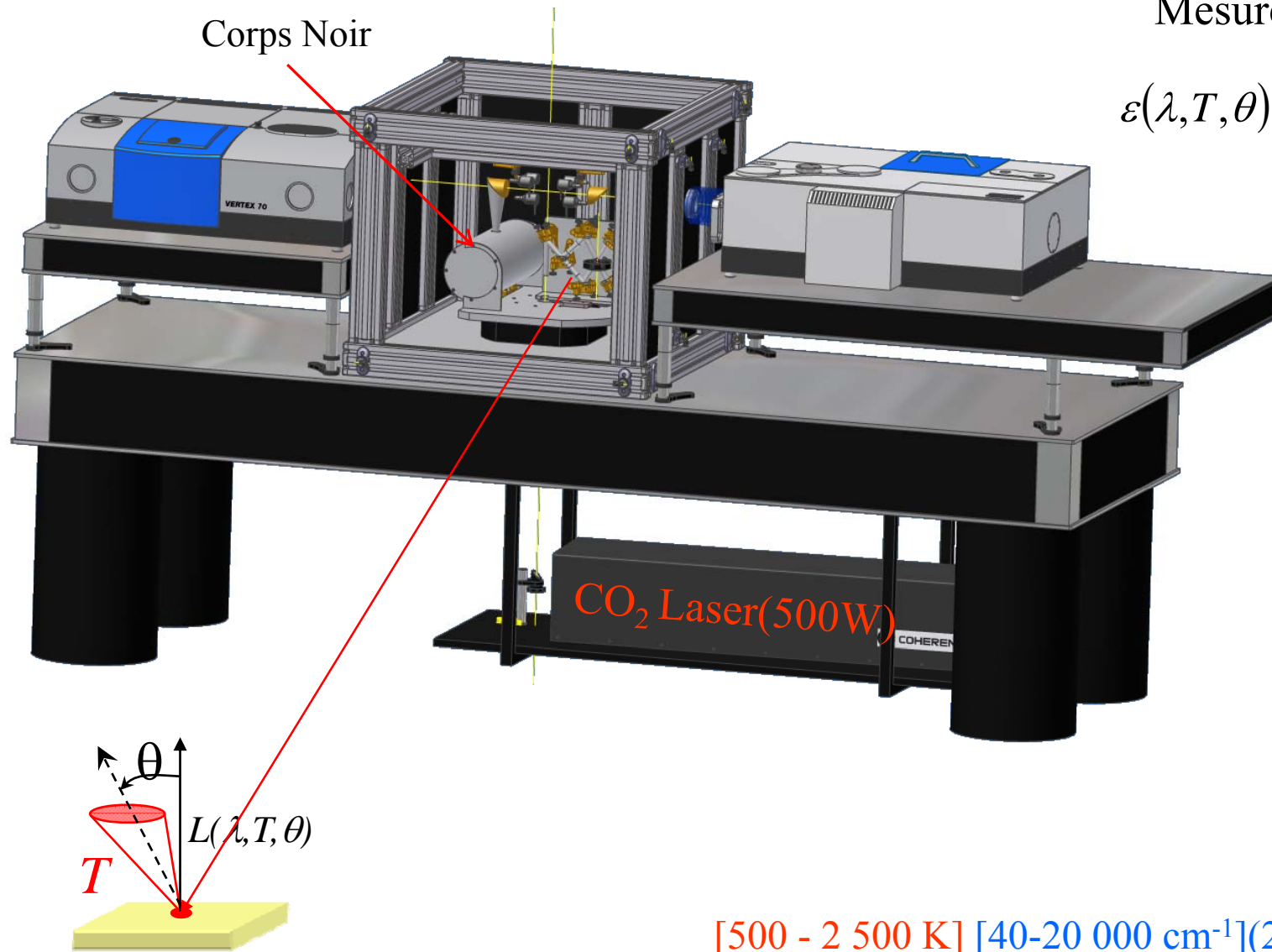
Loi de Kirchhoff

$$\varepsilon(\nu) = 1 - \rho(\nu) - \tau(\nu)$$

$\varepsilon(\nu)$



Dispositif Expérimental

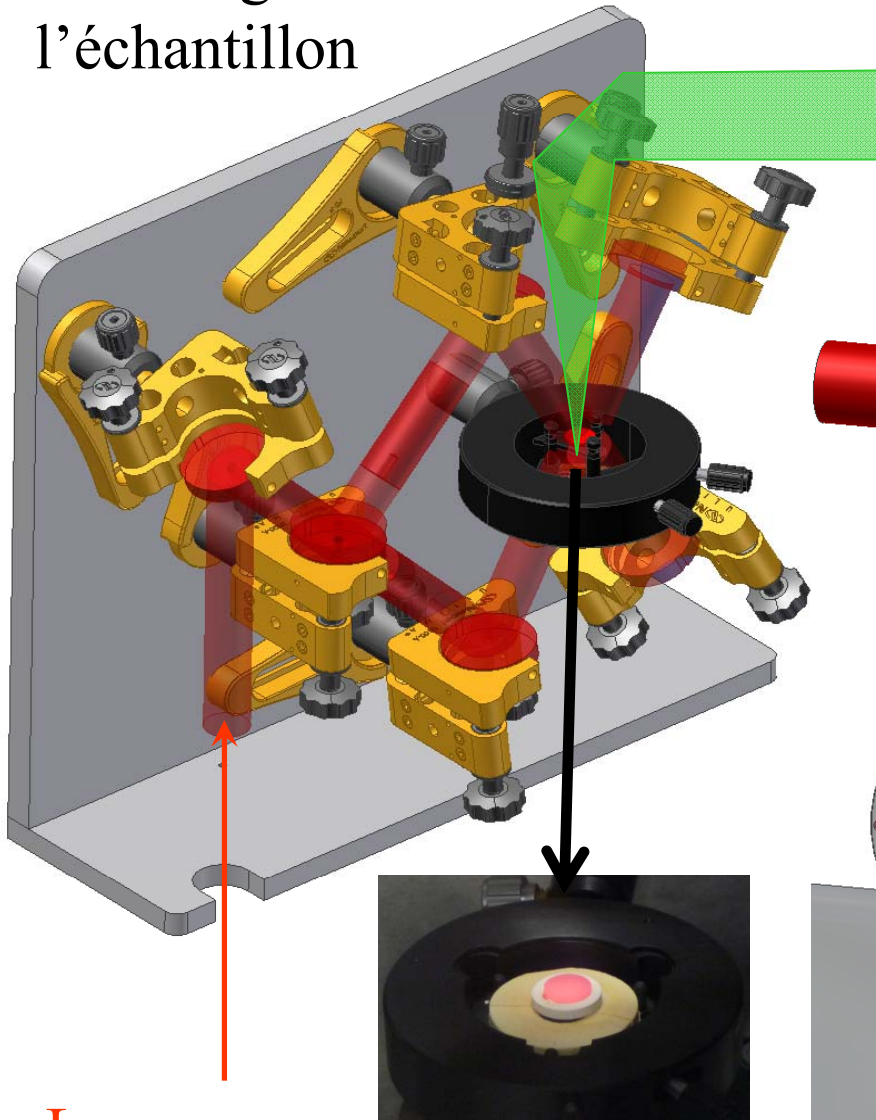


[500 - 2 500 K] [40-20 000 cm⁻¹](250-0.5 μm)

BRUKER Vertex 80v et Vertex 70

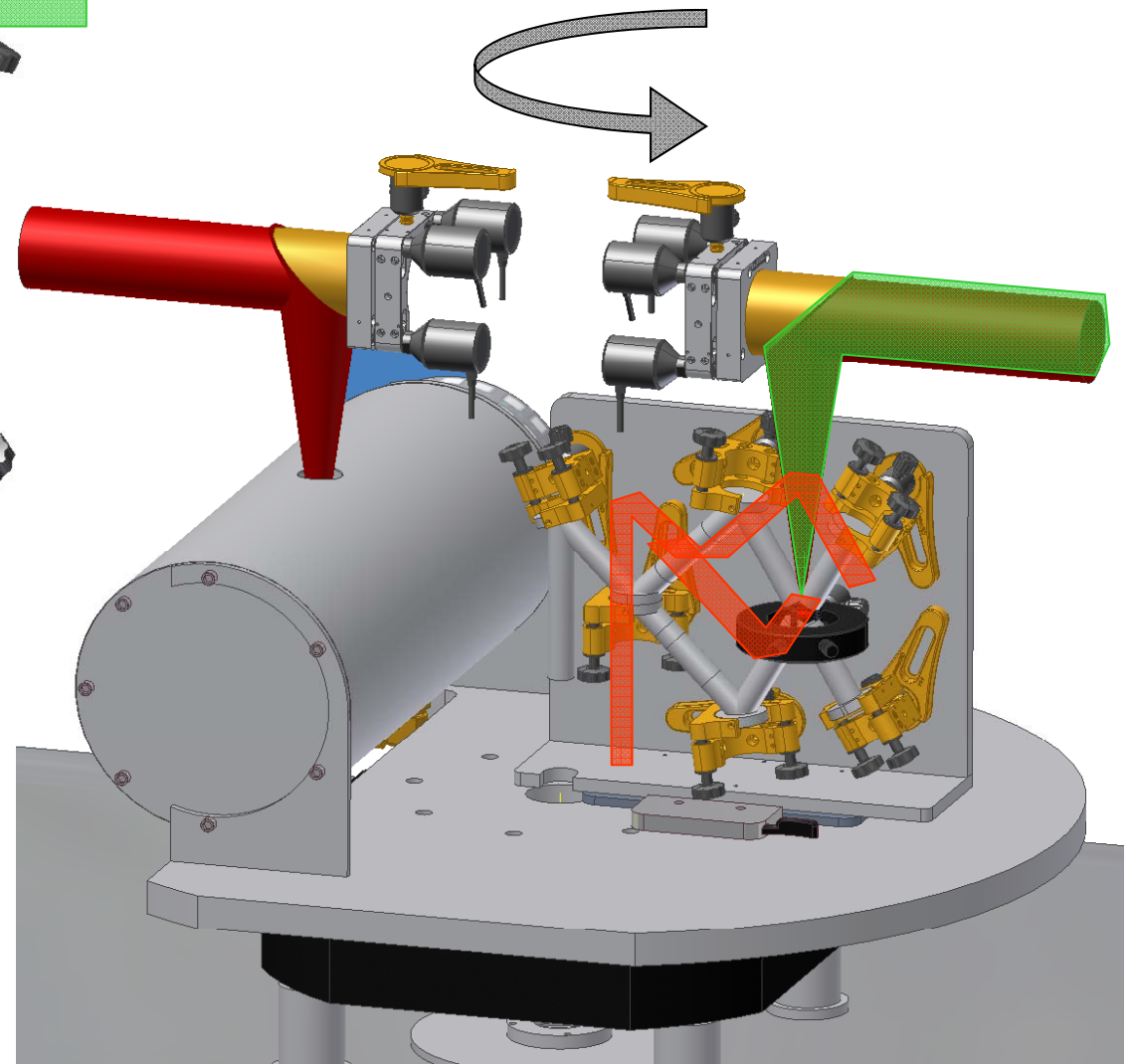
Dispositif Expérimental

Chauffage de l'échantillon



Laser
CO₂

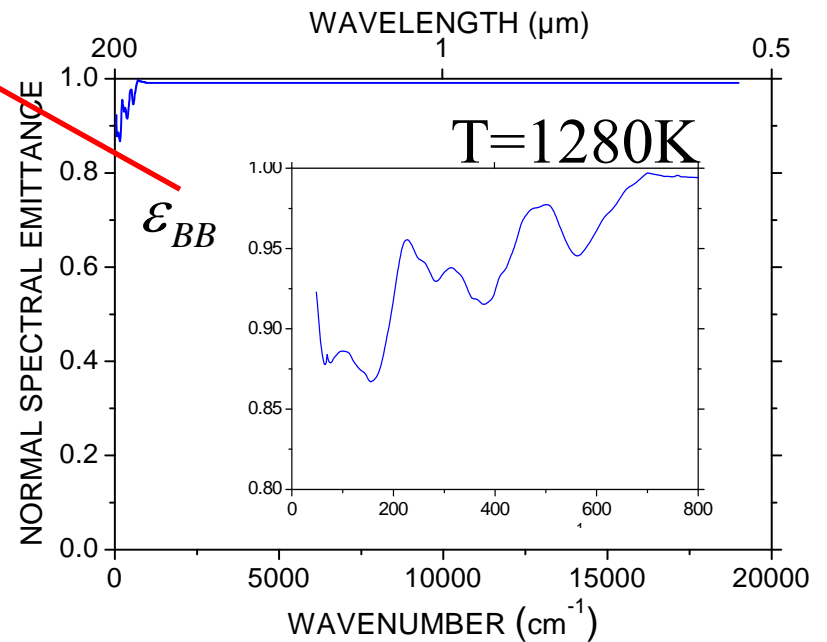
Et référence corps noir



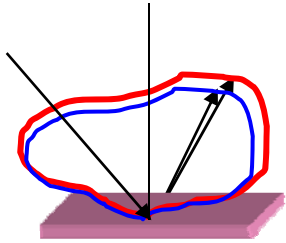
Mesure 3 Interférogrammes: I_{BB} , I_S , I_{RT}

$$\varepsilon = \frac{\overbrace{FT(I_S - I_{RT})}^{\text{Correction: contribution environnement}}}{\overbrace{FT(I_{BB} - I_{RT})}^{\text{Correction: Loi de Planck}}} \cdot \frac{\overbrace{P_{BB} - P_{RT}}^{\text{Correction: Corps Noir}}}{\overbrace{P_S - P_{RT}}^{\text{Autres Corrections: Contributions des optiques (fenêtres ...)}}} \varepsilon_{BB}$$

- FT*** Transformée de Fourier
- P*** Loi de Planck
- BB*** Corps Noir
- RT*** Température ambiante
- S*** Echantillon



La Pyrорélectométrie



Hypothèse : indicatrices de réflexion similaires pour 2 λ proches
Conditions: Corps opaque sans réflexion parasite sur la surface visée

$$L^o(T_{R,\lambda_r}) = (1 - \pi \eta_d^{\vec{i}_o, \vec{j}_o}(T) \rho_{F.D.}^{\vec{i}_o, \vec{j}_o}(T, \lambda_r)) L^o(T, \lambda_r)$$

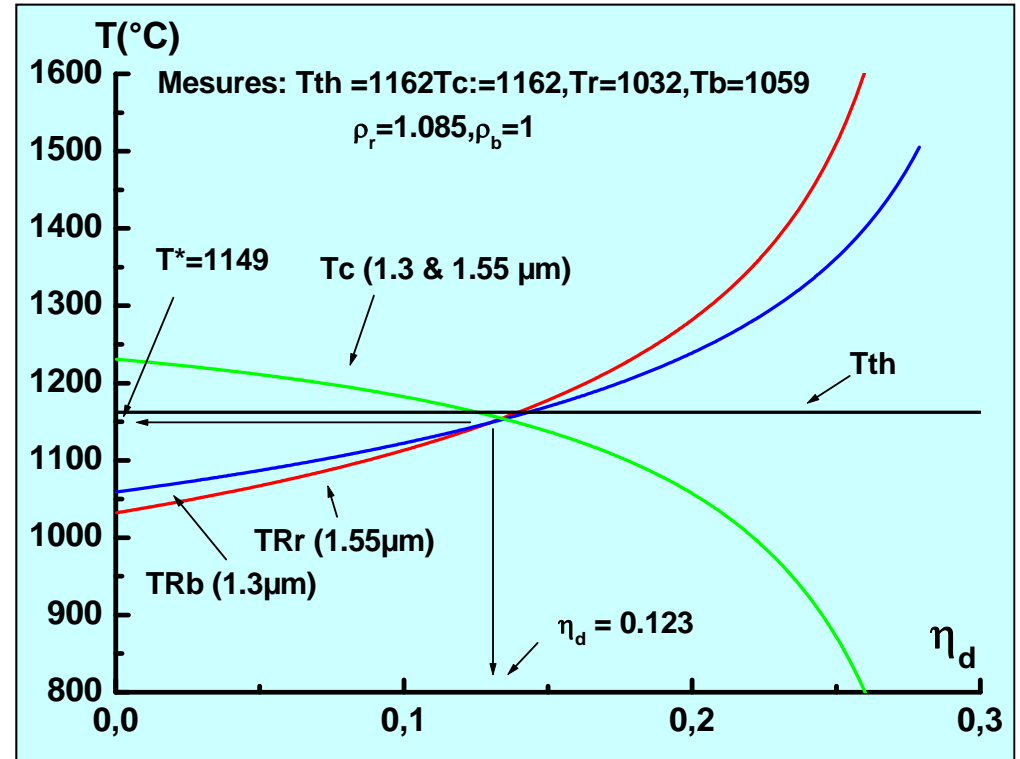
$$L^o(T_{R,\lambda_b}) = (1 - \pi \eta_d^{\vec{i}_o, \vec{j}_o}(T) \rho_{F.D.}^{\vec{i}_o, \vec{j}_o}(T, \lambda_b)) L^o(T, \lambda_b)$$

Mesures simultanées de 2 températures de luminance et 2 réflectivités bidirectionnelles avec l'introduction d'un facteur indépendant de λ permettant la résolution du système

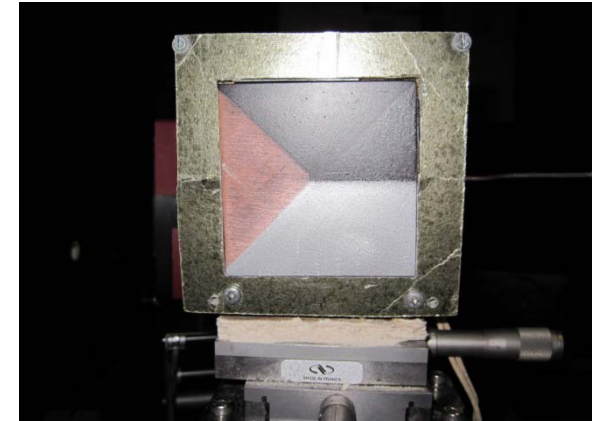
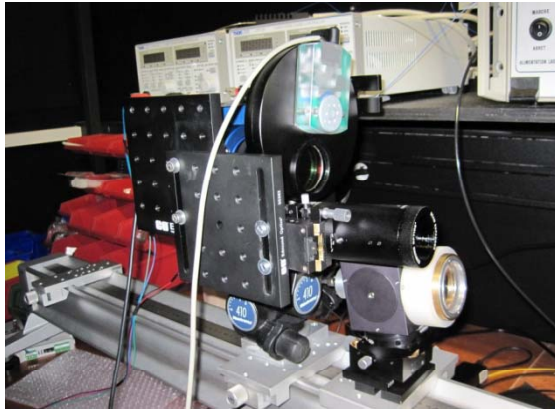
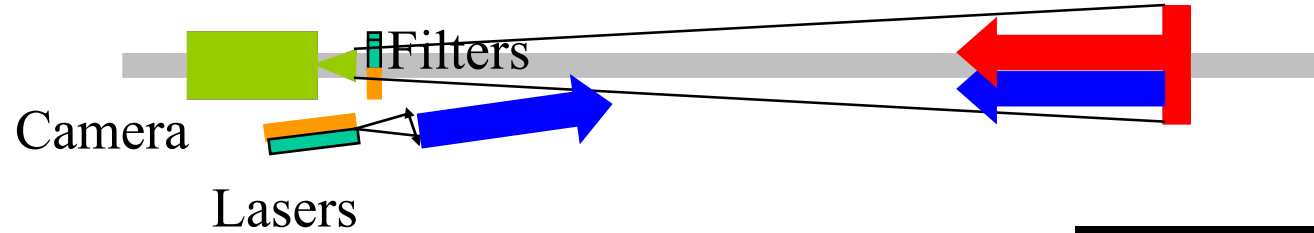
Points forts :

Mesure de T sans connaissance de l'émissivité en condition in situ et environnement sévère.
Méthode validée et testée sur les installations solaire et les réacteurs de fusion (ITER) (Publications).
Existence de prototypes commercialisés de type industriel.

Points faibles : Corps gris, 'corps noir', surfaces semi-transparentes.

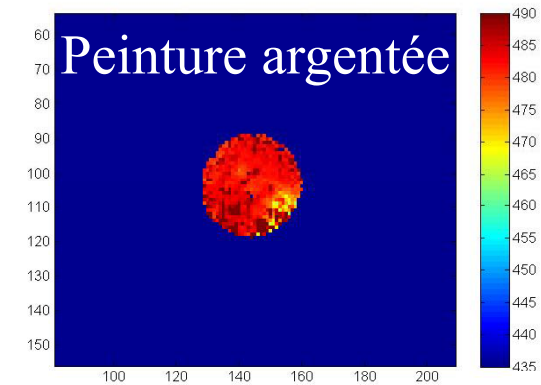
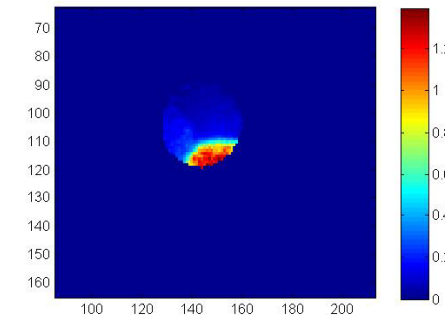
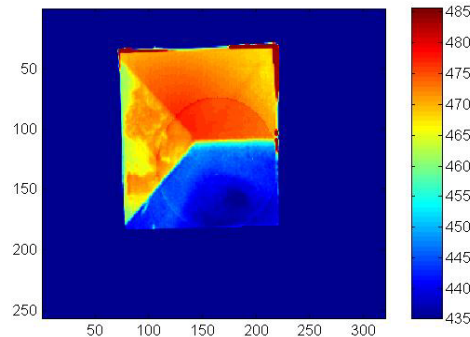


Thermoréfectométrie proche infrarouge bicouleur



◆ Mesure de champs de températures apparentes

◆ Mesure de champs de réflectivités bidirectionnelles



◆ calcul de champs de températures vraies

La Pyrométrie multi-spectrale

Pyrométrie multi-spectrale

Pour la mesure de température de surface

De céramiques semi-transparentes à haute température

Principe général des méthodes multi-spectrales

Identifier en même temps

- le facteur d'émission F
- la température de surface T

A partir

- de mesures de flux radiatifs spectraux ϕ_{λ_i}
- d'un modèle d'émission à N paramètres $F(a_1, a_2, \dots, a_N)$

MODELISATION

Modèle de facteur d'émission spectral à N paramètres

$$F_{\lambda}(a_1, a_2, \dots, a_N)$$

Fonction diélectrique :

$$\hat{\epsilon}(\nu) = \epsilon_1(\nu) + i\epsilon_2(\nu)$$

$$\hat{\epsilon}_{\omega} = \epsilon_{\infty} + \sum_{j=1}^n \Delta\epsilon_j \frac{\Omega_{jTO}^2}{\Omega_{jTO}^2 - \omega^2 - i\gamma_{jTO}\omega}$$

Indices de réfraction :

$$n(\nu) = \sqrt{\frac{\sqrt{\epsilon_1(\nu)^2 + \epsilon_2(\nu)^2} + \epsilon_1(\nu)}{2}}$$

$$k(\nu) = \sqrt{\frac{\sqrt{\epsilon_1(\nu)^2 + \epsilon_2(\nu)^2} - \epsilon_1(\nu)}{2}}$$

Facteur d'émission :

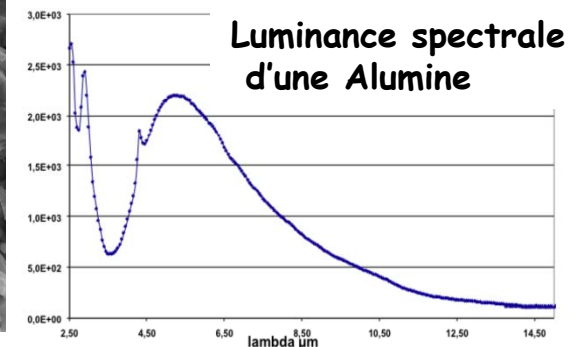
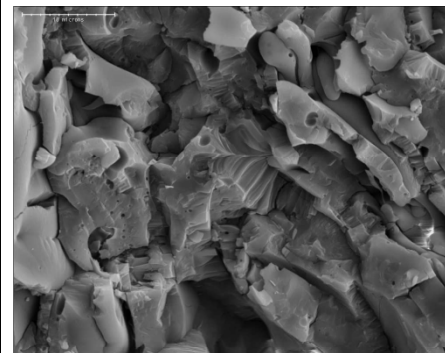
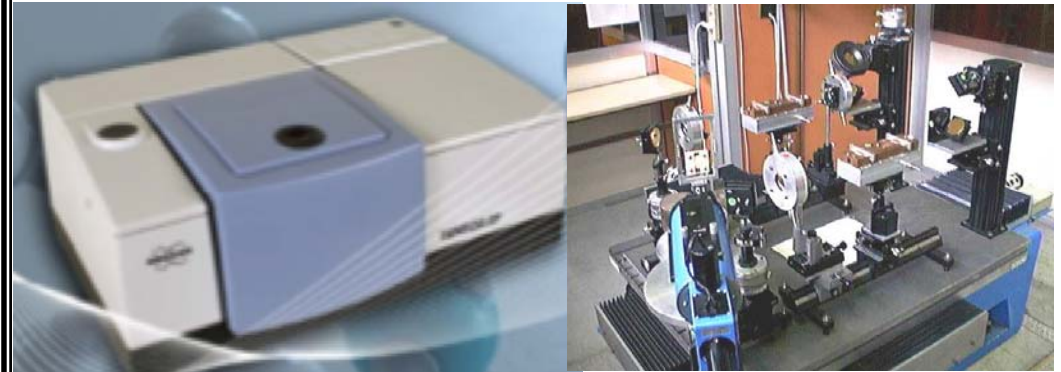
$$F(n, k)$$



Identification de N+1 paramètres
N coefficients (ai) de la fonction F, et la température T

MESURES EXPERIMENTALES

Spectrométrie d'émission

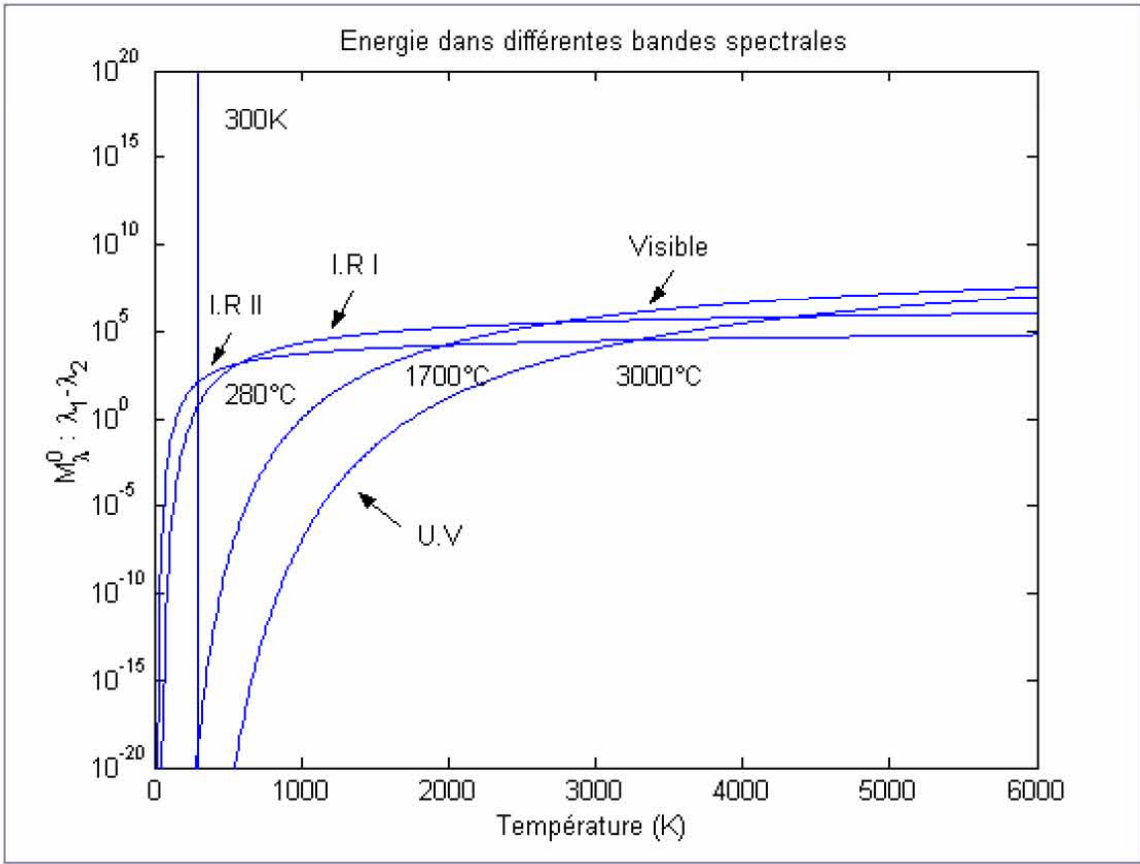


La Pyrométrie dans l'UV



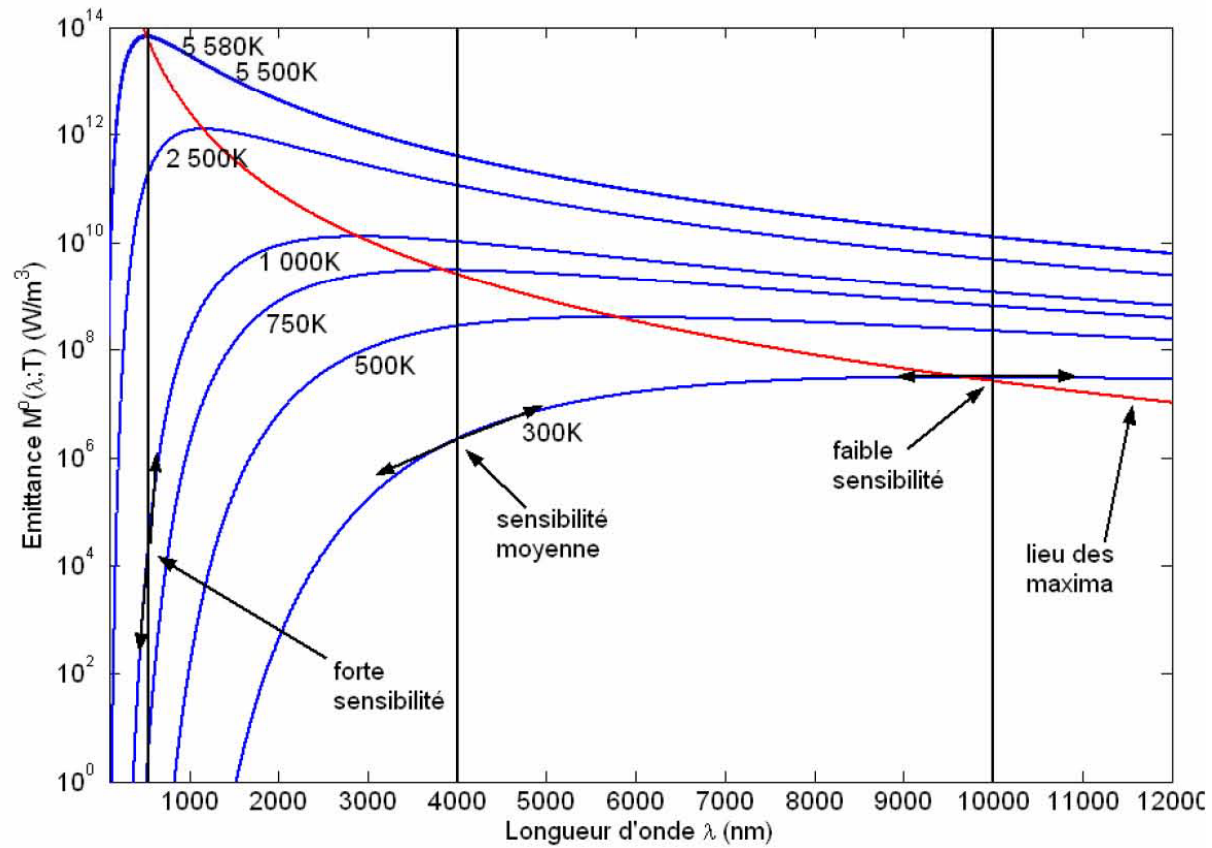
Intérêt des mesures à courtes longueur d'onde

- 4 gammes spectrales:
- [0,01 – 0,4] μm
↪ Ultraviolet
 - [0,4 – 0,8] μm
↪ Visible
 - [3 – 5] μm
↪ Infrarouge I
 - [8 – 12] μm
↪ Infrarouge II





Intérêt des mesures à courtes
longueur d'onde

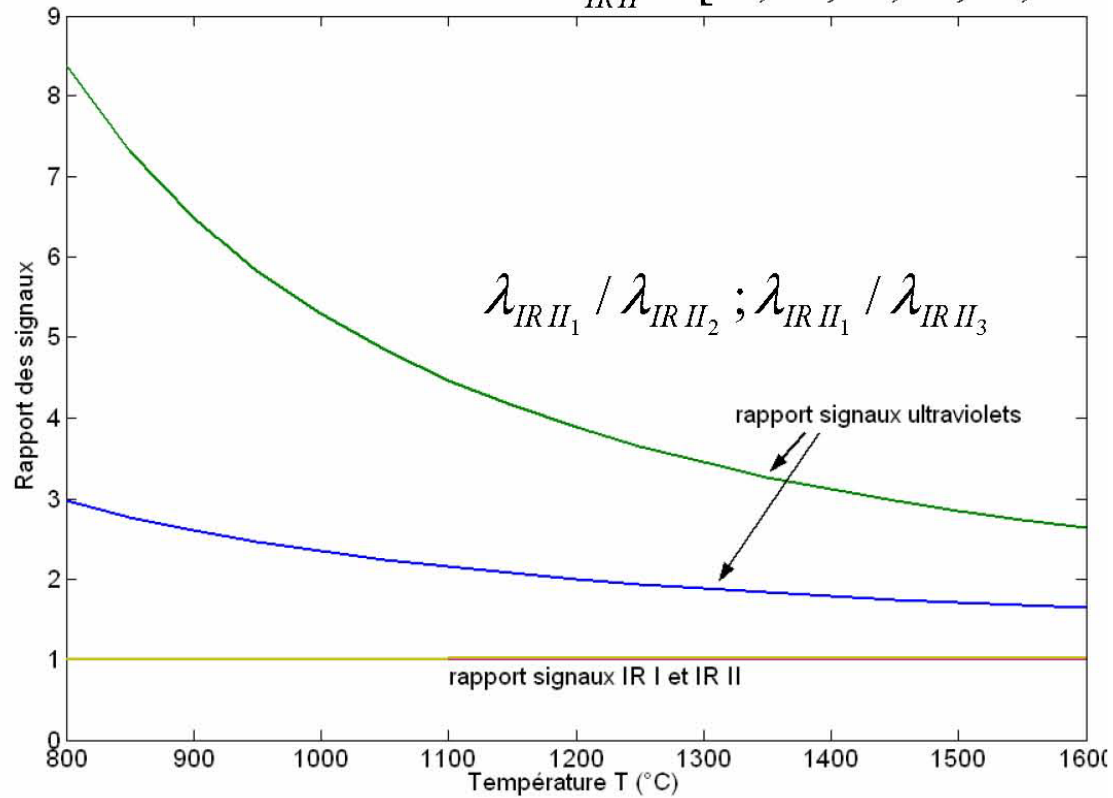




- forte sensibilité dans les UV en fonction de T

$$\lambda_{UV} = [0,38; 0,39; 0,40 \pm 0,01] \mu m \quad \lambda_{IRI} = [4,00; 4,01; 4,02 \pm 0,01] \mu m$$

$$\lambda_{IRII} = [10,00; 10,01; 10,02 \pm 0,01] \mu m$$





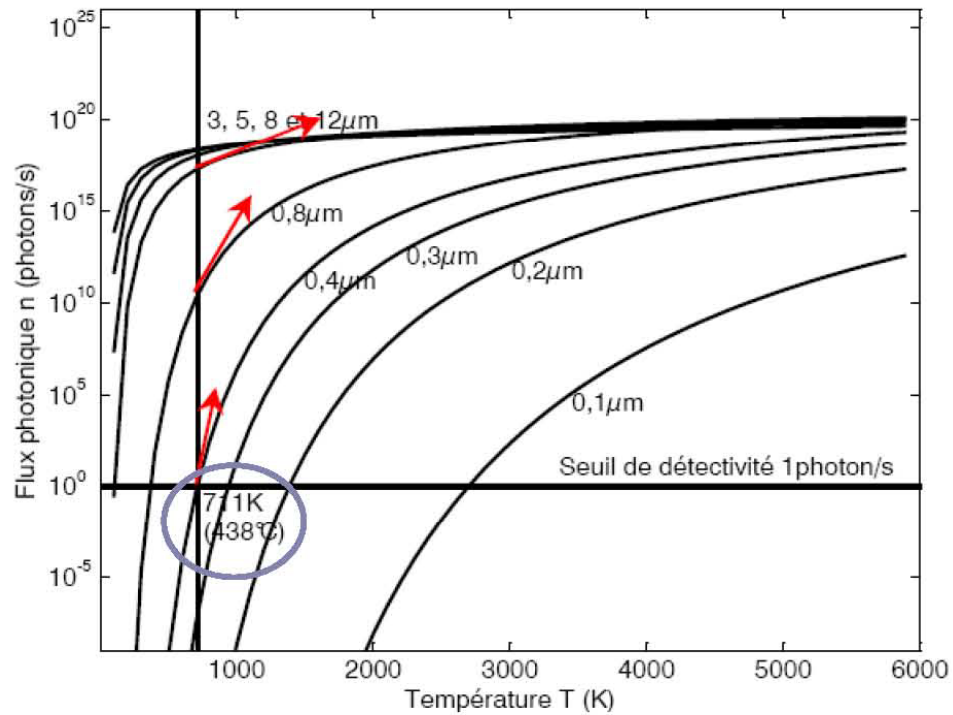
Intérêt des mesures à courtes longueur d'onde

Faible niveau d'énergie → Energie mais ~~Photons Emis~~ (on parle d'émittance photonique)

$$E_{\lambda} = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

$$\psi_{\lambda}^0 = M_{\lambda}^0 / E_{\lambda}$$

Nbr. Photons émis /s
à une énergie donnée
pour une température T





Intérêt des mesures à courtes longueur d'onde

La mesure de la température T par *voie optique* dépend de l'émissivité

$$M_{\lambda}(T) \simeq \varepsilon C_1 \lambda^{-5} e^{-C_2/\lambda T}$$



$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_L} + \frac{\lambda}{C_2} \ln(\varepsilon)$$

T_L : température de Luminance

Soit: $\varepsilon = \varepsilon_{\text{vrai}} + e_{\varepsilon}$

$$\frac{dM_{\lambda}}{M_{\lambda}} = \frac{d\varepsilon}{\varepsilon} + C_2 \frac{dT}{\lambda T^2}$$

①

Le biais sera d'autant plus faible
que la longueur d'onde sera petite

$$e_T = T_{\text{mesurée}} - T_{\text{vrai}} = -\lambda \frac{T^2}{C_2} \frac{e_{\varepsilon}}{\varepsilon}$$

②

L'émissivité des matériaux augmente
pour de faibles longueurs d'onde

« Erreur Systématique »



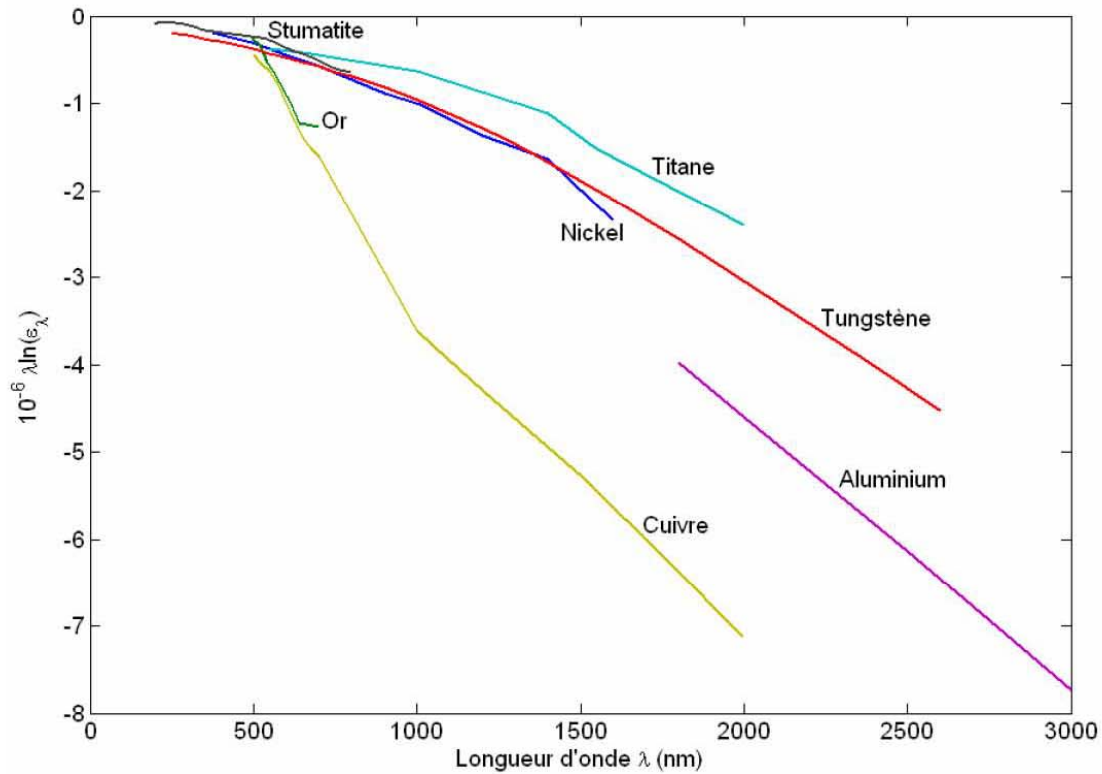
- Erreur sur T

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_L} + \frac{\lambda}{C_2} \ln(\epsilon)$$

$$\alpha_\lambda = \sqrt{\frac{4\pi\mu_0 c_0}{r_e \lambda_0}}$$

- Erreur relative sur T

$$\frac{e_T}{T} = -\lambda \frac{T}{C_2} \frac{e_\epsilon}{\epsilon}$$





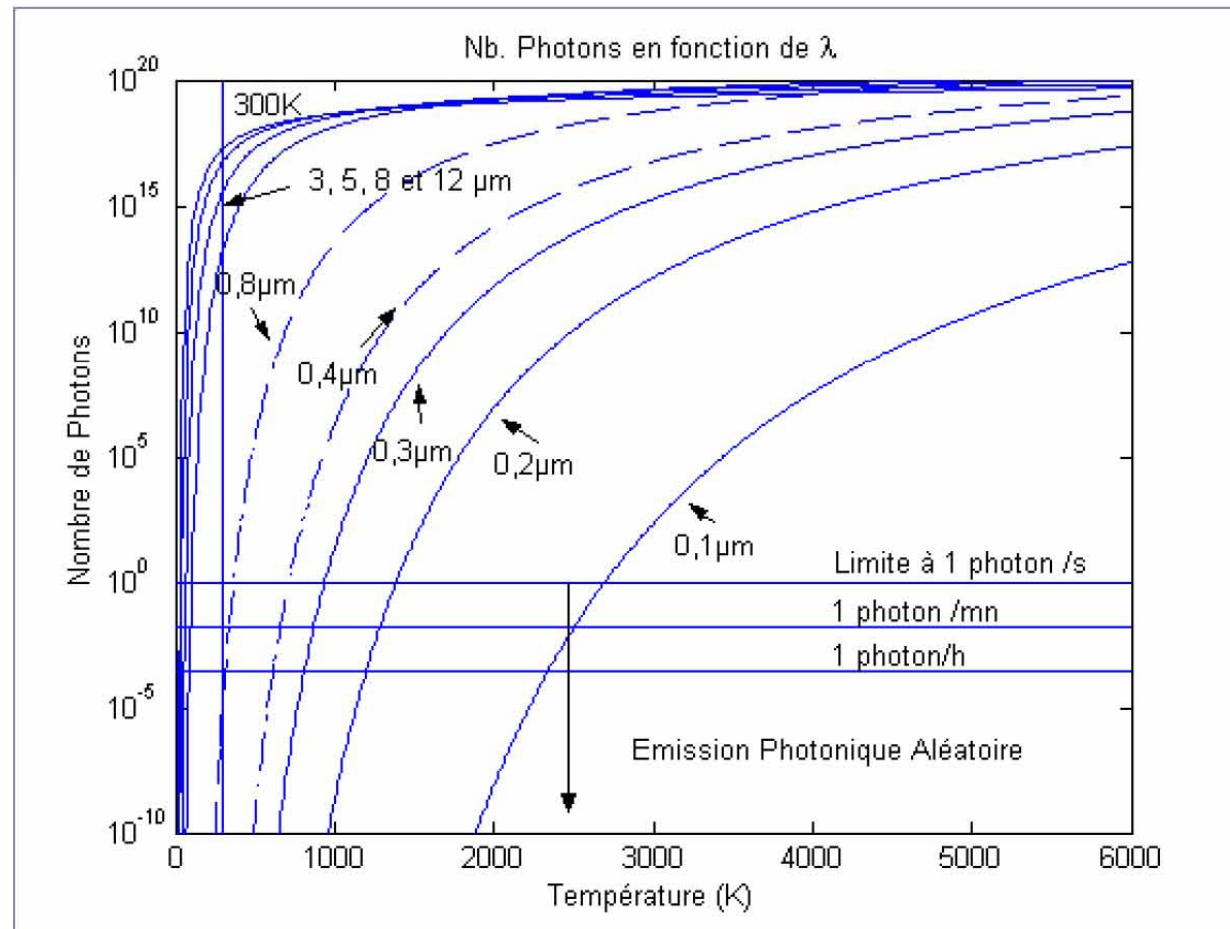
Nombre de photons émis pour des surfaces $\sim \lambda$

1 photon /s ($0.4\mu\text{m}$)



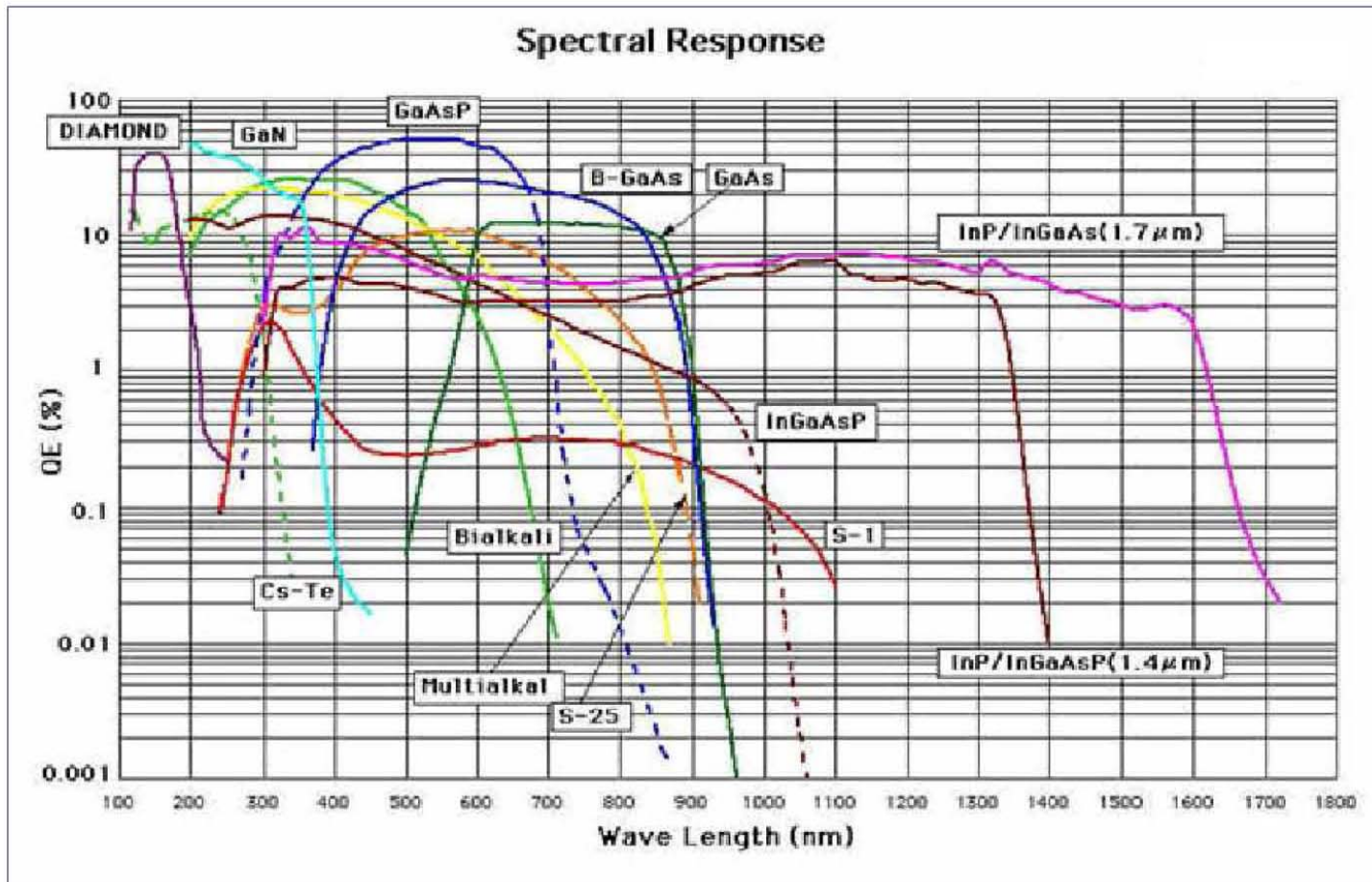
711 K \rightarrow 438°C

**Mesure par
émission propre
difficile**





Réponse Spectrale de différents éléments





Le microscope thermique UV

