



***Société française de thermique
Groupe « Hautes températures »***

Développement d'un banc pyrométrique dédié à la mesure de la température et de l'émissivité par la méthode multispectrale Application aux métaux à hautes températures

Laurent DEJAEGHERE, Thomas PIERRE, Muriel CARIN, Philippe LE MASSON

Le 13 février 2014

- Plan de l'exposé -

1. Contexte de l'étude
2. La méthode multispectrale
3. Description du banc pyrométrique
4. Premiers essais sur machine Gleeble®
5. Résultats, analyses et perspectives

Constat général

Procédé hautes températures : matière sous différents états (solide, liquide, gazeux).

Essais *in situ* réels coûteux.

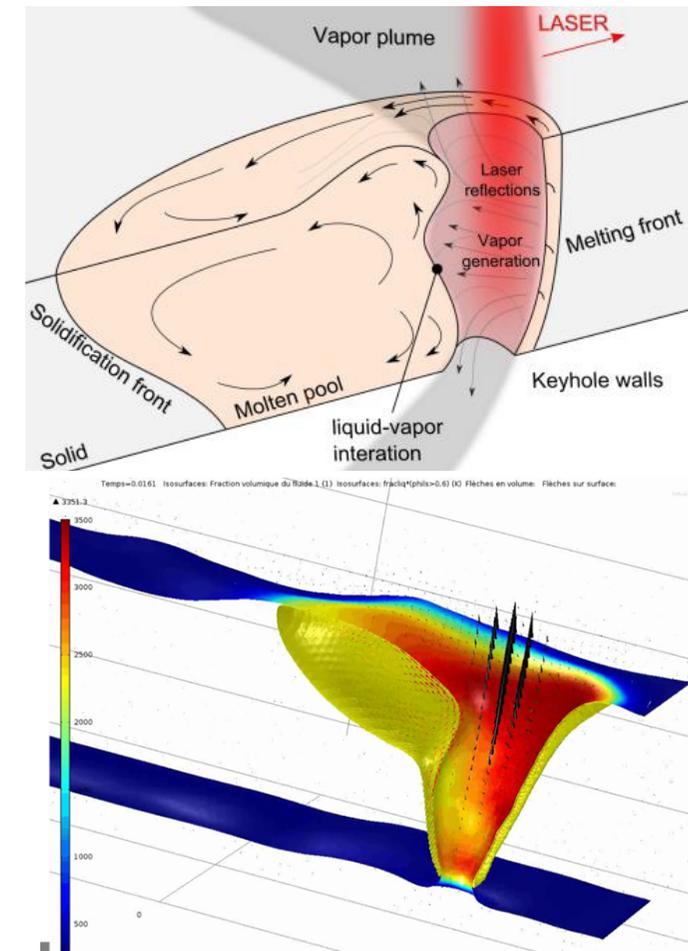
Modélisation multiphysique du procédé.

Nécessité de connaître les propriétés de la matière :

- conductivité, diffusivité thermiques,
- masse volumique,
- chaleur spécifique,
- tension de surface,
- viscosité...

Peu de données disponibles dans la littérature.

Exemple : le soudage laser



[Thèse Mickaël Courtois, LIMATB – ArcelorMittal, 2011-2014]

1-/ Développement d'un dispositif hautes températures permettant de caractériser des échantillons métalliques.

2-/ **Autres observations sur les procédés hautes températures :**

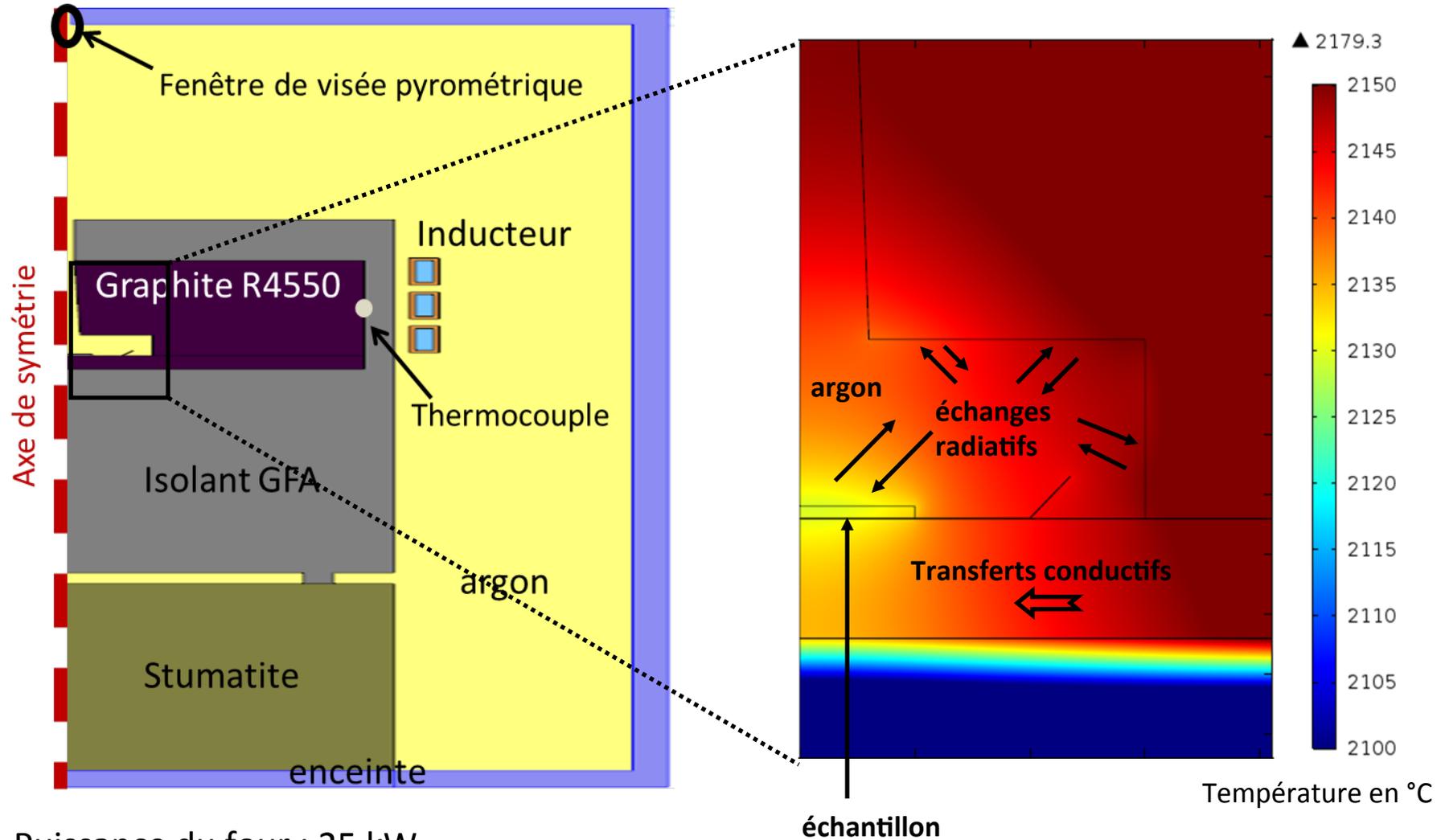
- Cinétiques rapides des phénomènes thermiques.
- Forts gradients sur de faibles échelles.

Comment contrôler la température ?

Solutions :

- mesure avec contact (thermocouples) : savoir-faire du laboratoire.
Type K $\rightarrow \theta < 1\ 300\ ^\circ\text{C}$
Type C $\rightarrow \theta < 2\ 300\ ^\circ\text{C}$
- sans contact : **mesure de la température par méthode multispectrale.**

Développement parallèle : modélisation à l'aide de Comsol Multiphysics® pour confrontation des mesures thermocouple/pyrométrie/simulation.



Puissance du four : 25 kW

Chauffage inductif des parois graphite, puis conducto-radiatif de l'échantillon.

[Thèse Laurent DEJAEGHERE, LIMATB – IRT Jules Verne, 2012-2015]



Loi de Planck

$$L_{\lambda}^0(T) = \frac{2hc^2 \lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1} \approx 2hc^2 \lambda^{-5} e^{-\frac{hc}{k\lambda T}}$$

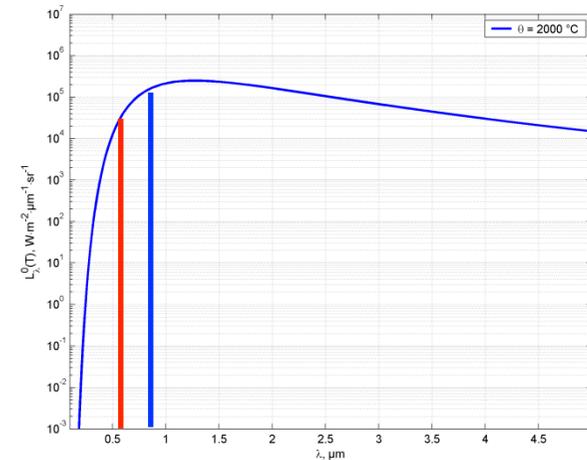
Approximation de Wien

$$\lambda T \ll 14\,000 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

- **Mesures bichromatiques** : estimation de $T = T_{ij}$ uniquement (hypothèse du corps gris).

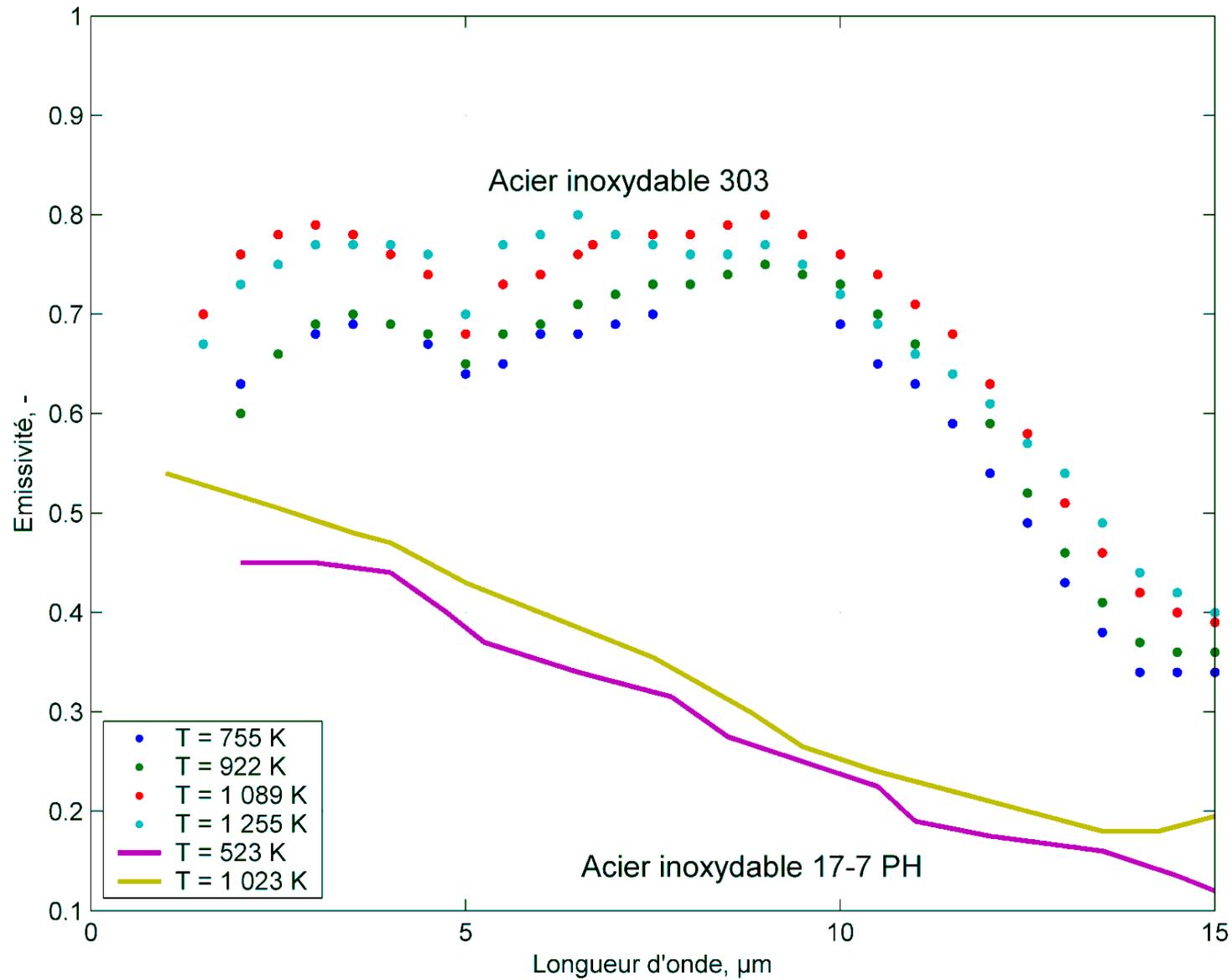
$$T_{ij} = \frac{hc(\lambda_j^{-1} - \lambda_i^{-1})}{k \ln \left[\frac{L_{\lambda_i}}{L_{\lambda_j}} \left(\frac{\lambda_j}{\lambda_i} \right)^{-5} \right]}$$

$$\varepsilon_{\lambda_i} \approx \varepsilon_{\lambda_j}$$



- **Mesures polychromatiques** : estimation de T et de $\varepsilon(\lambda)$:

$$\sum_i \left| \Phi_i^{th} [T, \varepsilon(\lambda)] - \Phi_i^{exp} \right|^2 \rightarrow 0$$



Modèle	Drude	Hagen-Rubens	exponentiel	température spectrale inverse	norme	polynomial
Loi	$\varepsilon_\lambda = \frac{a_0}{\sqrt{\lambda}}$	$\varepsilon_\lambda = a_0 \sqrt{\frac{T}{\lambda}}$	$\varepsilon_\lambda = e^{a_0\lambda + a_1T}$	$\varepsilon_\lambda = e^{\frac{a_0}{T} + a_1\lambda}$	$\varepsilon_\lambda = \frac{1}{1 + a_0\lambda^2}$	$\varepsilon_\lambda = \sum_{i=1}^n a_i \lambda^i$
Dépendance	λ	λ, T	λ, T	λ, T	λ	λ
Paramètres à estimer a_i	1	1	2	2	1	n

Conclusion :

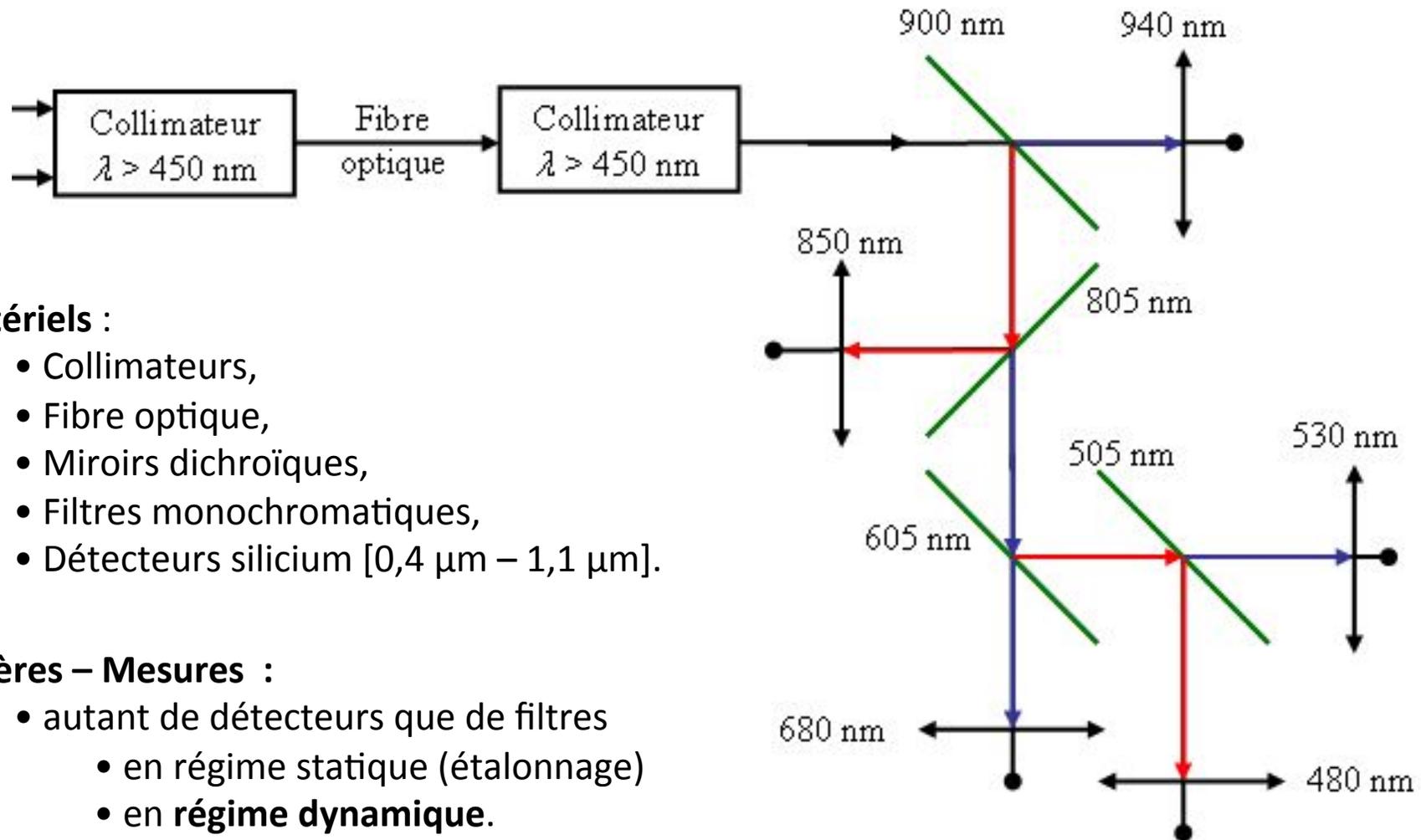
Maximum : 2 paramètres + T

Plusieurs niveaux de T d'où un nombre de longueurs d'onde plus important

Notre choix : **5 longueurs d'onde**

[T. Duvaut *et al.*, 1995]

[C. Martin *et al.*, 1980]



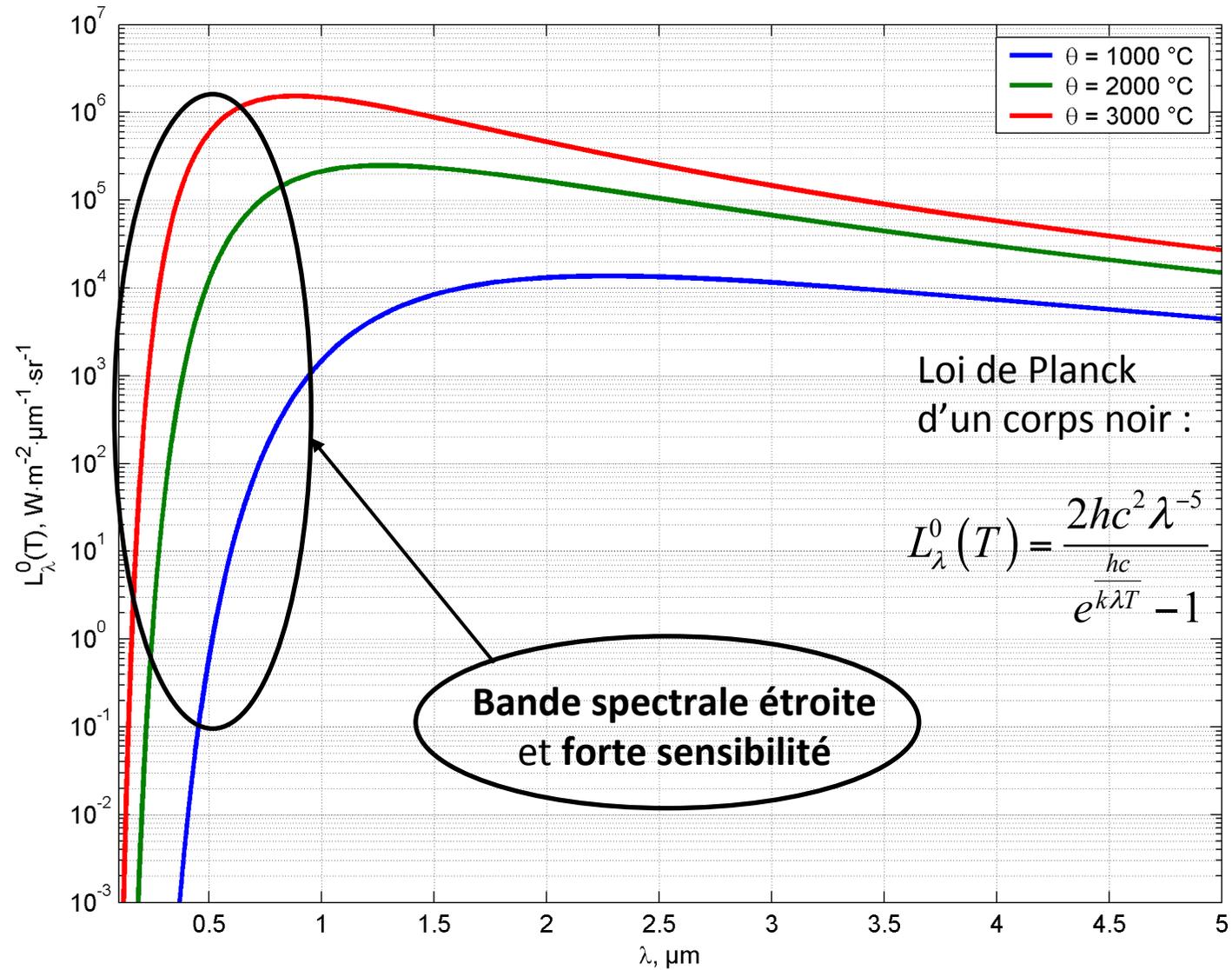
Matériels :

- Collimateurs,
- Fibre optique,
- Miroirs dichroïques,
- Filtres monochromatiques,
- Détecteurs silicium [0,4 μm – 1,1 μm].

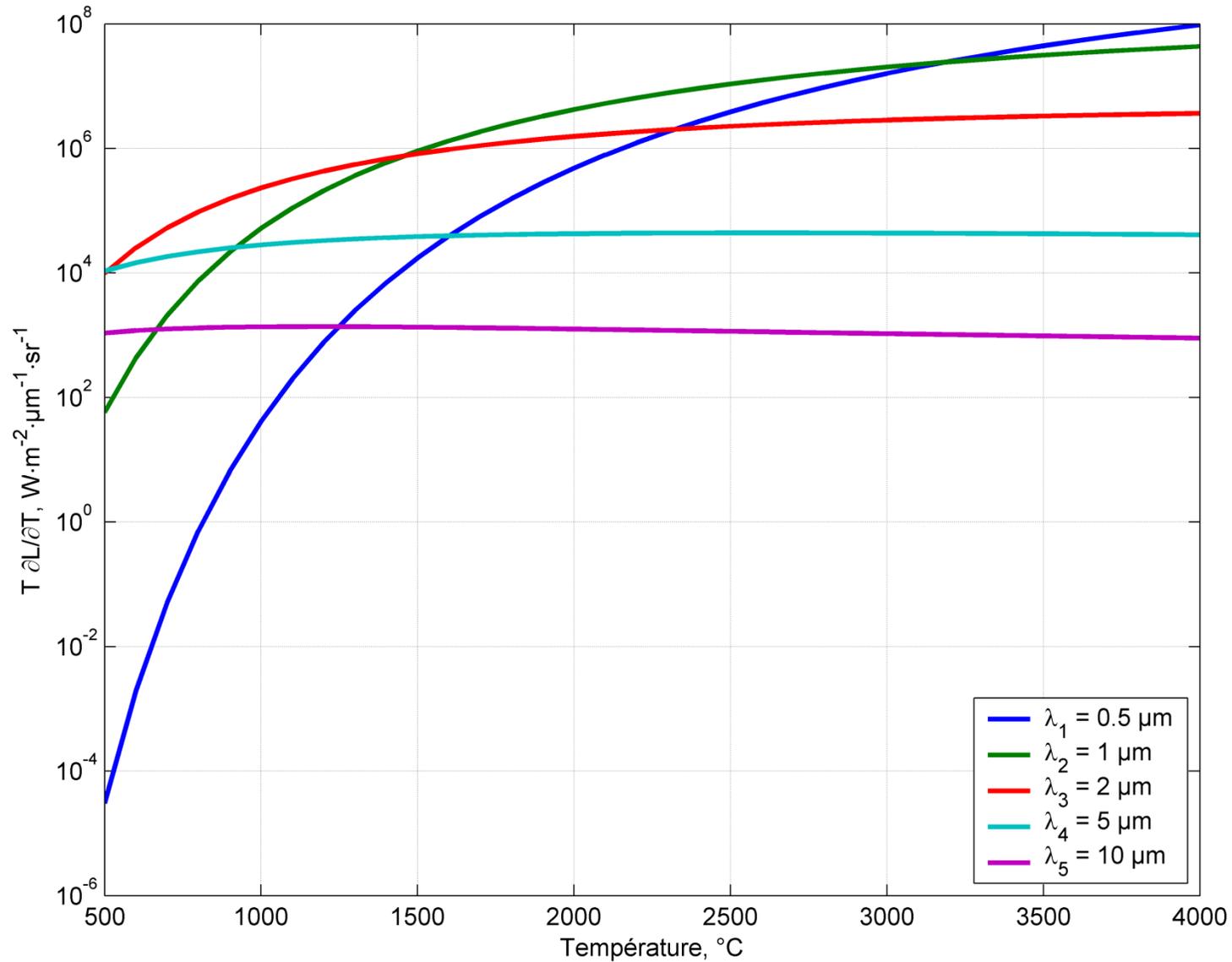
Critères – Mesures :

- autant de détecteurs que de filtres
 - en régime statique (étalonnage)
 - en régime dynamique.
- résolution spatiale à définir en fonction des niveaux de flux

Quelle gamme spectrale ?



Sensibilités réduites



Avantages des courtes longueurs d’onde

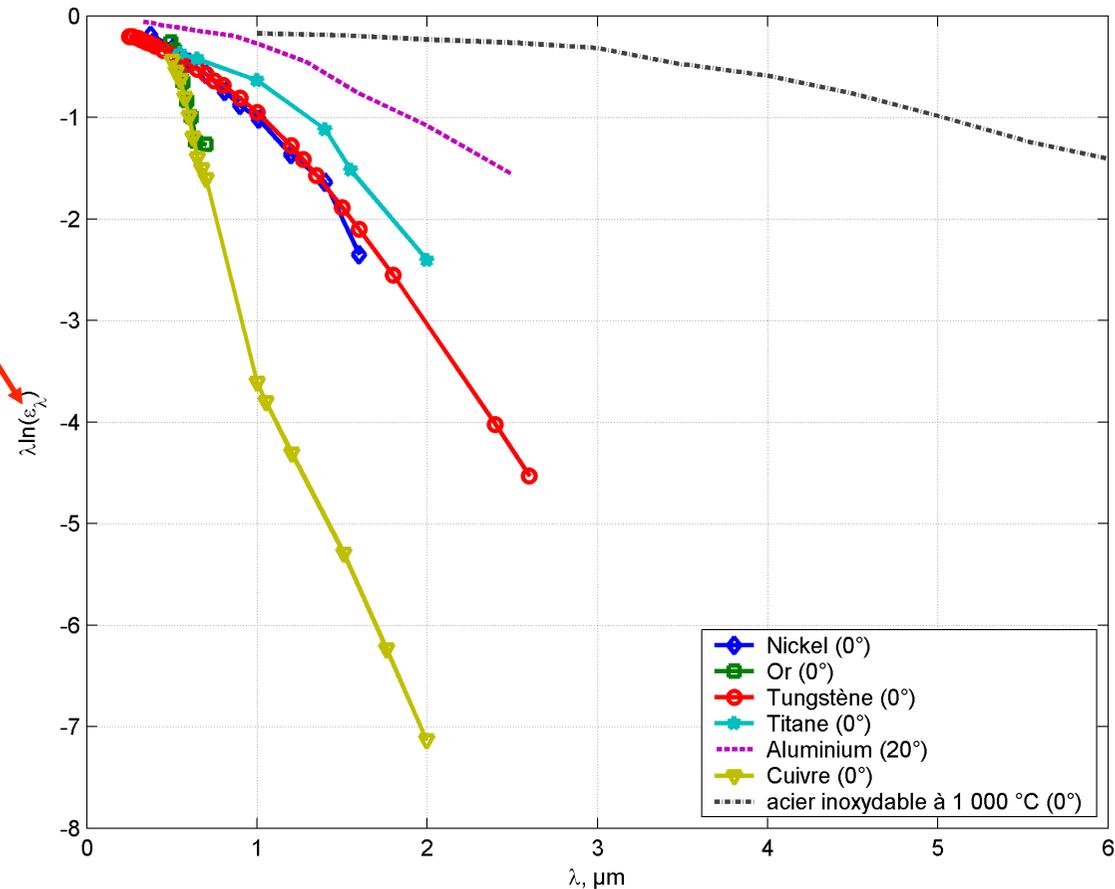
Caractéristiques de certains métaux : ε augmente quand λ diminue.

1. Comparaison entre deux mesures dont une avec $\varepsilon = 1$ (T_L)

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_L} = \frac{k\lambda}{hc} \ln(\varepsilon) = f(\lambda \ln(\varepsilon))$$

2. Erreur sur la température en monochromatique :

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{k\lambda T}{hc} \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} + \left| \frac{5k\lambda T}{hc} - 1 \right| \frac{\Delta \lambda}{\lambda}$$



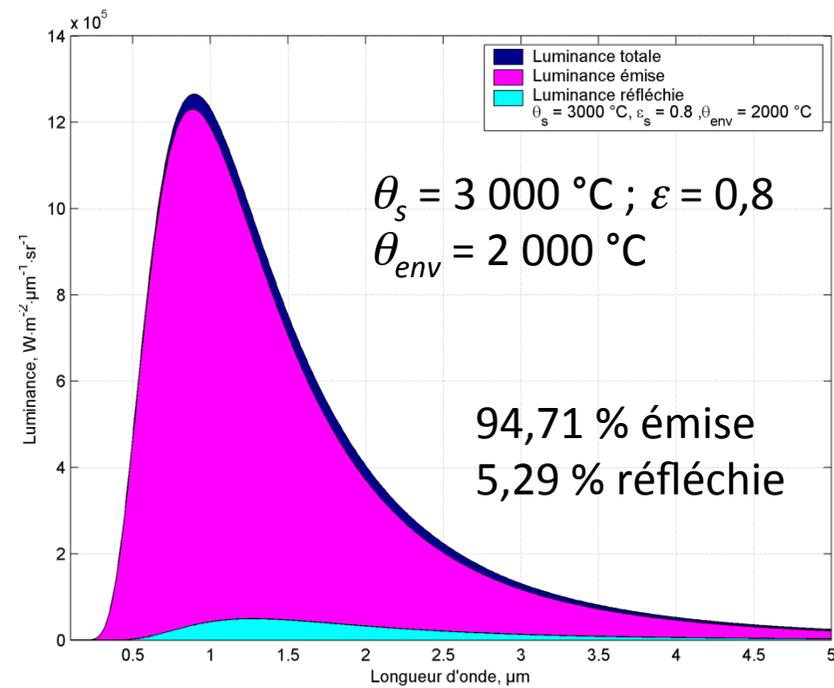
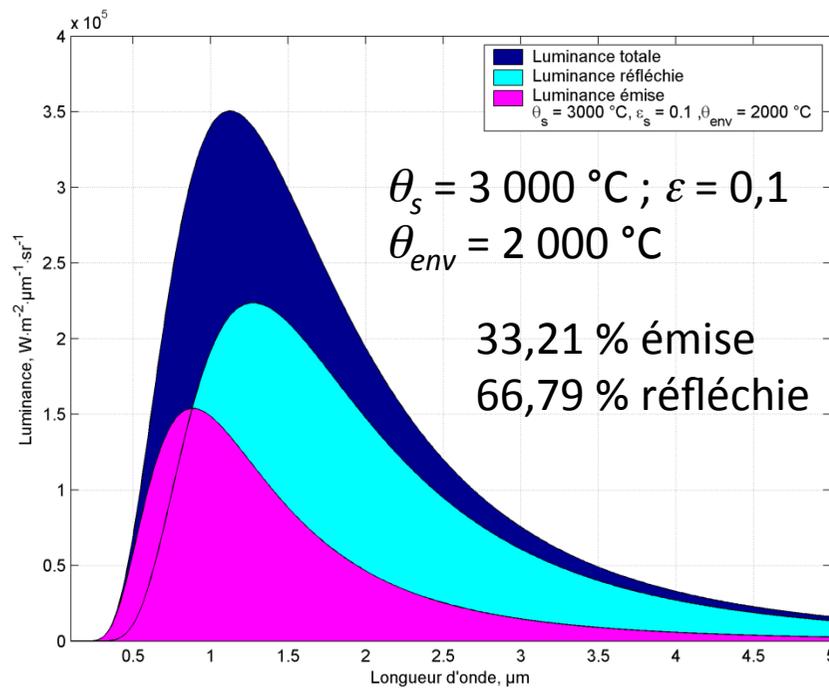
[Y. S. Touloukian *et al.*, 1970]

[R. Siegel, J. Howell, 2002]

Influence de l'environnement – Environnement défavorable

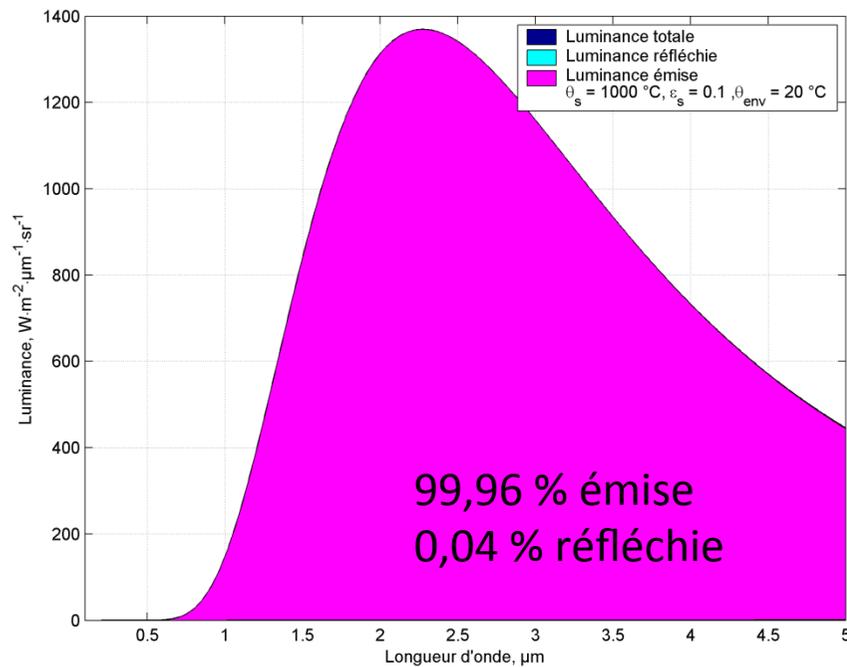
$$L_\lambda = \varepsilon(\lambda, T) L_\lambda^0(T_s) + [1 - \varepsilon(\lambda, T)] L_\lambda^0(T_{env})$$

■ Luminance totale
 ■ Luminance émise
 ■ Luminance réfléchie



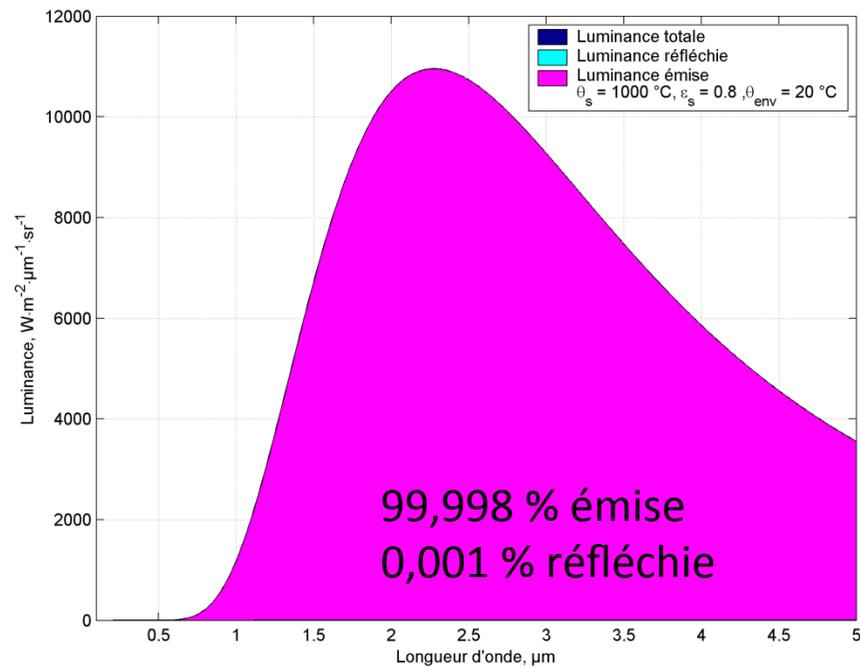
Influence de l'environnement – Environnement favorable

■ Luminance totale
 ■ Luminance émise
 ■ Luminance réfléchie



$$\theta_s = 1000 \text{ }^\circ C ; \epsilon = 0,1$$

$$\theta_{env} = 20 \text{ }^\circ C$$



$$\theta_s = 1000 \text{ }^\circ C ; \epsilon = 0,8$$

$$\theta_{env} = 20 \text{ }^\circ C$$

Environnement favorable pour l'étalonnage du banc pyrométrique.

Bilan :

- Gamme spectrale **visible – proche infrarouge**.
- Choix de **cinq longueurs d’onde** : T et paramètres de $\varepsilon(\lambda, T)$.

Question : critère de définition des longueurs d’onde ?

Recherche :

$$T_{ij} = \frac{hc(\lambda_j^{-1} - \lambda_i^{-1})}{k \ln \left[\frac{L_{\lambda_i} \varepsilon_{\lambda_j}}{L_{\lambda_j} \varepsilon_{\lambda_i}} \left(\frac{\lambda_j}{\lambda_i} \right)^{-5} \right]}$$

Développement limité à l’ordre 1 de l’émissivité en fonction de la longueur d’onde :

$$\frac{\varepsilon_{\lambda_j}}{\varepsilon_{\lambda_i}} = 1 + \frac{1}{\varepsilon_{\lambda_i}} \frac{d\varepsilon}{d\lambda} (\lambda_j - \lambda_i) \quad \text{L’erreur est d’autant plus faible que } \lambda_i \text{ et } \lambda_j \text{ sont proches}$$

Erreur sur la température en bichromatique [Pierre, 2007] :

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\frac{\Delta L_{\lambda_i}}{L_{\lambda_i}} + \frac{\Delta L_{\lambda_j}}{L_{\lambda_j}} + \left| 5 - \frac{hc}{k\lambda_i T} - \frac{\lambda_i}{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{d\lambda} \right| \frac{\Delta \lambda_i}{\lambda_i} + \left| 5 - \frac{hc}{k\lambda_j T} - \frac{\lambda_j}{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{d\lambda} \right| \frac{\Delta \lambda_j}{\lambda_j}}{\frac{hc}{kT} |\lambda_j^{-1} - \lambda_i^{-1}|}$$

3. Le banc pyrométrique – Le choix des longueurs d'onde

Analyse de notre choix :

$\lambda_1 = 480 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 530 \text{ nm}$, $\lambda_3 = 680 \text{ nm}$, $\lambda_4 = 850 \text{ nm}$, $\lambda_5 = 940 \text{ nm}$

Premier critère : le dénominateur doit être supérieur à 1.

$$\frac{hc}{kT} (\lambda_j^{-1} - \lambda_i^{-1}) \geq 1 \quad \rightarrow \quad \Delta\lambda \geq \frac{k}{hc} T \lambda_i \lambda_j \approx \frac{k}{hc} T \lambda_i^2$$

Second critère : le rapport des flux théoriques doit être supérieur à 2, voire 1,5.

θ (°C)	$\lambda_1 = 480 \text{ nm}$	$ \lambda_1 - \lambda_2 = 50 \text{ nm}$	$ \lambda_1 - \lambda_3 = 200 \text{ nm}$	$ \lambda_1 - \lambda_4 = 370 \text{ nm}$	$ \lambda_1 - \lambda_5 = 560 \text{ nm}$
	$\Delta\lambda_{\text{mini}} \text{ (nm)}$	Φ_2/Φ_1	Φ_3/Φ_1	Φ_4/Φ_1	Φ_5/Φ_1
1 000	21	5,6	178	1 622	3 502
2 000	37	2,1	8,5	17	22
3 000	53	1,45	2,6	3,1	3,1

θ (°C)	$\lambda_2 = 530 \text{ nm}$	$ \lambda_2 - \lambda_1 = 50 \text{ nm}$	$ \lambda_2 - \lambda_3 = 150 \text{ nm}$	$ \lambda_2 - \lambda_4 = 320 \text{ nm}$	$ \lambda_2 - \lambda_5 = 410 \text{ nm}$
	$\Delta\lambda_{\text{mini}} \text{ (nm)}$	Φ_2/Φ_1	Φ_3/Φ_2	Φ_4/Φ_2	Φ_5/Φ_2
1 000	25	5,6	31	289	623
2 000	45	2,1	4,0	8,5	10
3 000	64	1,45	1,8	2,2	2,1

3. Le banc pyrométrique – Le choix des longueurs d'onde

θ (°C)	$\lambda_3 = 680$ nm	$ \lambda_3 - \lambda_1 =$ 200 nm	$ \lambda_3 - \lambda_2 =$ 150 nm	$ \lambda_3 - \lambda_4 =$ 170 nm	$ \lambda_3 - \lambda_5 =$ 260 nm
	$\Delta\lambda$ (nm)	Φ_3/Φ_1	Φ_3/Φ_2	Φ_4/Φ_3	Φ_5/Φ_3
1 000	21	178	31	9,	19
2 000	37	8,5	4,0	2,4	2,6
3 000	53	2,6	1,8	1,2	1,2

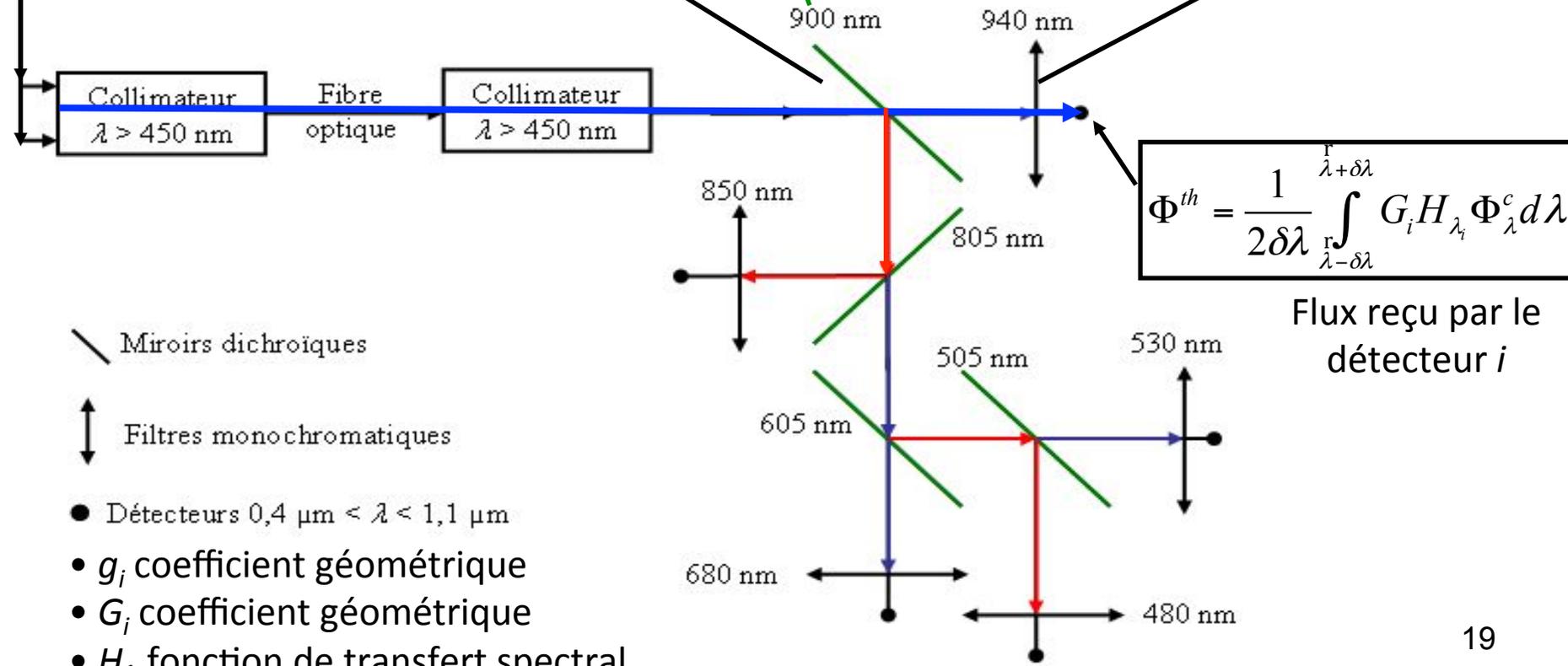
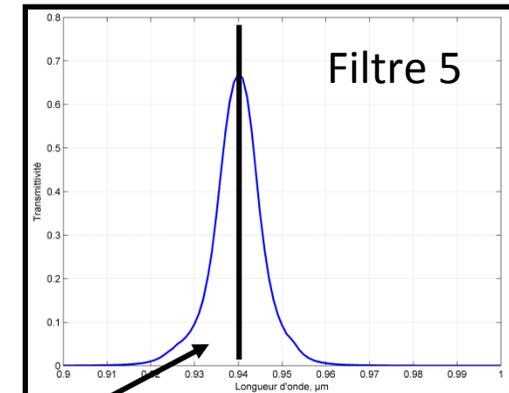
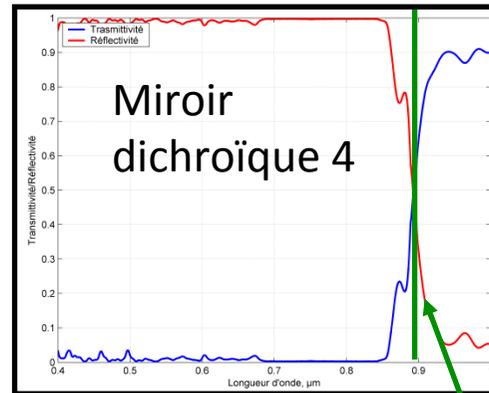
θ (°C)	$\lambda_4 = 850$ nm	$ \lambda_4 - \lambda_1 =$ 370 nm	$ \lambda_4 - \lambda_2 =$ 320 nm	$ \lambda_4 - \lambda_3 =$ 170 nm	$ \lambda_4 - \lambda_5 =$ 90 nm
	$\Delta\lambda$ (nm)	Φ_4/Φ_1	Φ_4/Φ_1	Φ_4/Φ_3	Φ_5/Φ_4
1 000	64	1 622	289	9	2,2
2 000	115	17	8,5	2,1	1,2
3 000	164	3,1	2,2	1,2	1,0

θ (°C)	$\lambda_5 = 940$ nm	$ \lambda_5 - \lambda_1 =$ 560 nm	$ \lambda_5 - \lambda_2 =$ 410 nm	$ \lambda_5 - \lambda_3 =$ 260 nm	$ \lambda_5 - \lambda_4 =$ 90 nm
	$\Delta\lambda$ (nm)	Φ_5/Φ_1	Φ_5/Φ_2	Φ_5/Φ_3	Φ_5/Φ_4
1 000	79	3 502	623	19	2,2
2 000	140	22	10	2,6	1,2
3 000	200	3,1	2,1	1,2	1,0

3. Le banc pyrométrique – Le chemin optique

Flux émis par la surface s

$$\Phi_{\lambda}^c = \varepsilon(\lambda) s g_i L_{\lambda}^0(T_s)$$



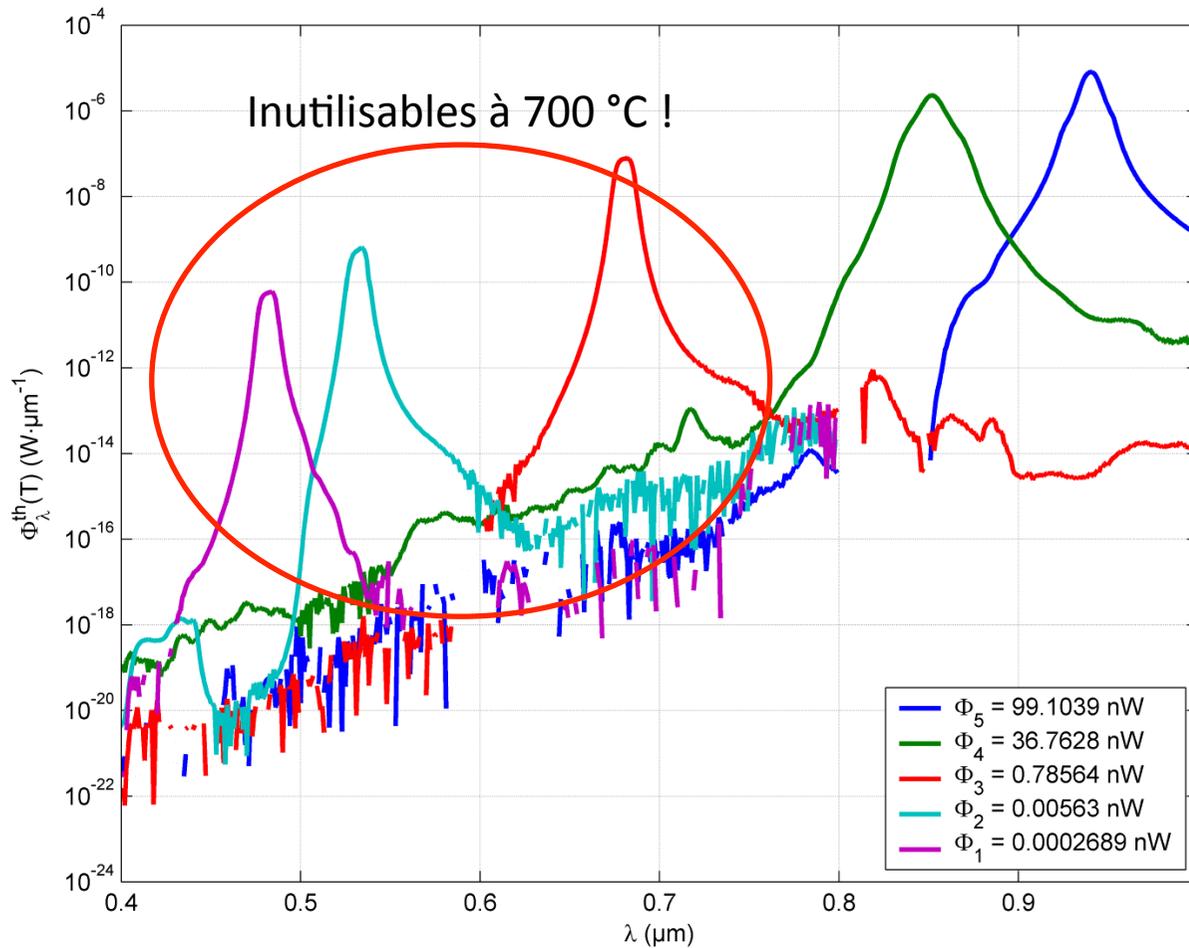
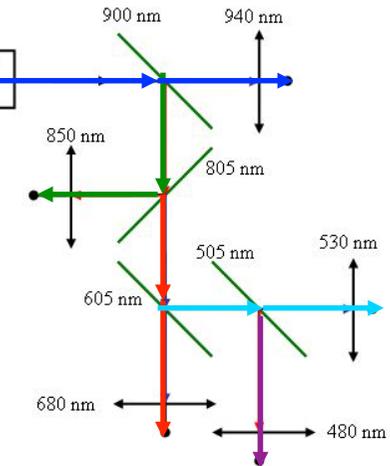
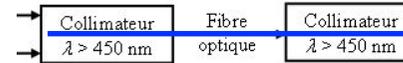
$$\Phi^{th} = \frac{1}{2\delta\lambda} \int_{\lambda-\delta\lambda}^{\lambda+\delta\lambda} G_i H_{\lambda_i} \Phi_{\lambda}^c d\lambda$$

Flux reçu par le détecteur i

- ↘ Miroirs dichroïques
- ↕ Filtres monochromatiques
- Détecteurs $0,4 \mu\text{m} < \lambda < 1,1 \mu\text{m}$
- g_i coefficient géométrique
- G_i coefficient géométrique
- H_{λ} fonction de transfert spectral

Détecteurs silicium
 [50 nW – 50 mW]
 [400 nm – 1 100 nm]

$\theta_s = 700 \text{ }^\circ\text{C}$



$$H_{\lambda_1} = \rho_{\lambda_4}^m \tau_{\lambda_3}^m \rho_{\lambda_2}^m \rho_{\lambda_1}^m \tau_{\lambda_1}^f$$

$$H_{\lambda_2} = \rho_{\lambda_4}^m \tau_{\lambda_3}^m \rho_{\lambda_2}^m \tau_{\lambda_1}^m \tau_{\lambda_2}^f$$

$$H_{\lambda_3} = \rho_{\lambda_4}^m \tau_{\lambda_3}^m \tau_{\lambda_2}^m \tau_{\lambda_3}^f$$

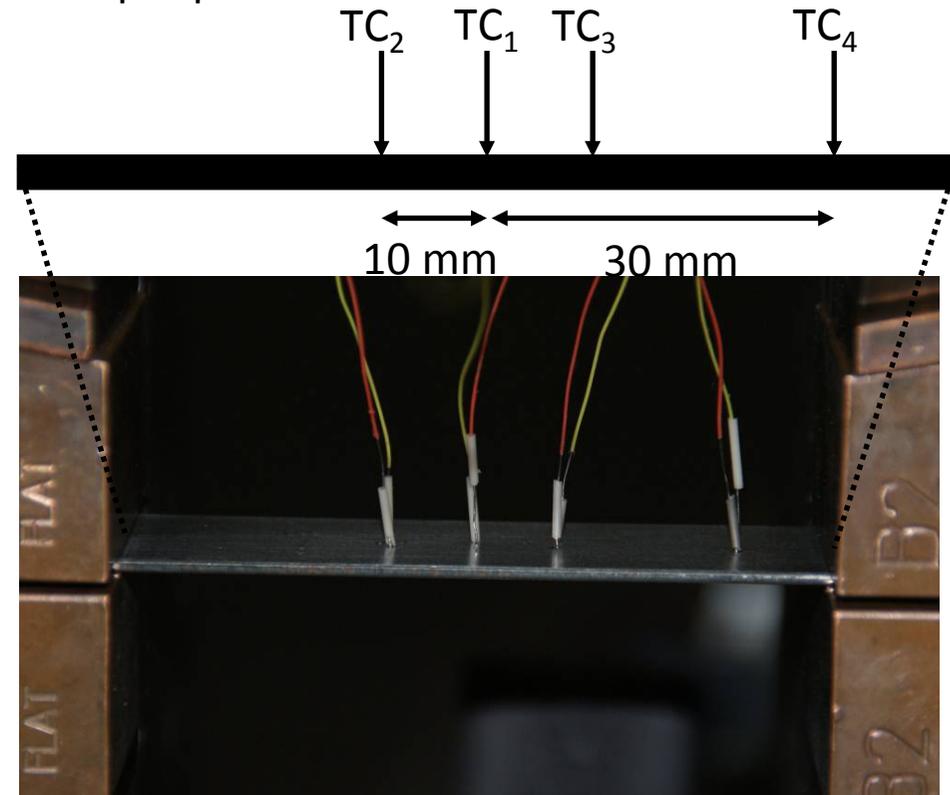
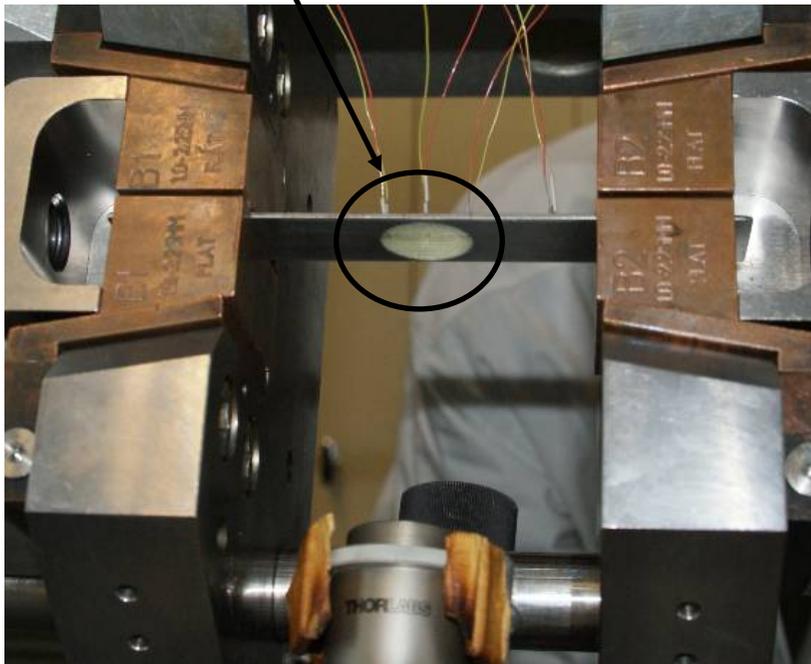
$$H_{\lambda_4} = \rho_{\lambda_4}^m \rho_{\lambda_3}^m \tau_{\lambda_4}^f$$

$$H_{\lambda_5} = \tau_{\lambda_4}^m \tau_{\lambda_5}^f$$

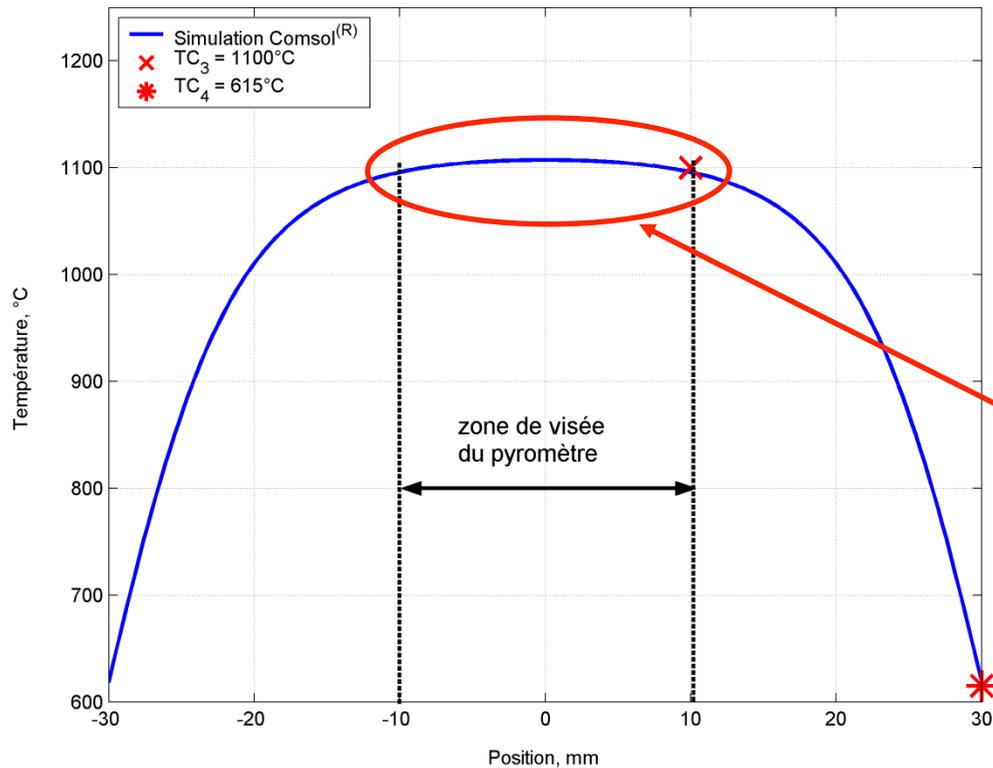
Procédure expérimentale

- Un échantillon métallique est coincé entre deux mors et chauffé par effet Joule.
- Quatre thermocouples de type C : TC₁ (au centre), TC₂, TC₃ et TC₄.
- Consigne en température fixée par rapport à TC₃.
- Essais en statique et dynamique ($10\text{ °C}\cdot\text{s}^{-1}$) sous air ambiant.
- Paliers de 30 s à 500 s de 700 °C à 1 200 °C par pas de 100 °C.

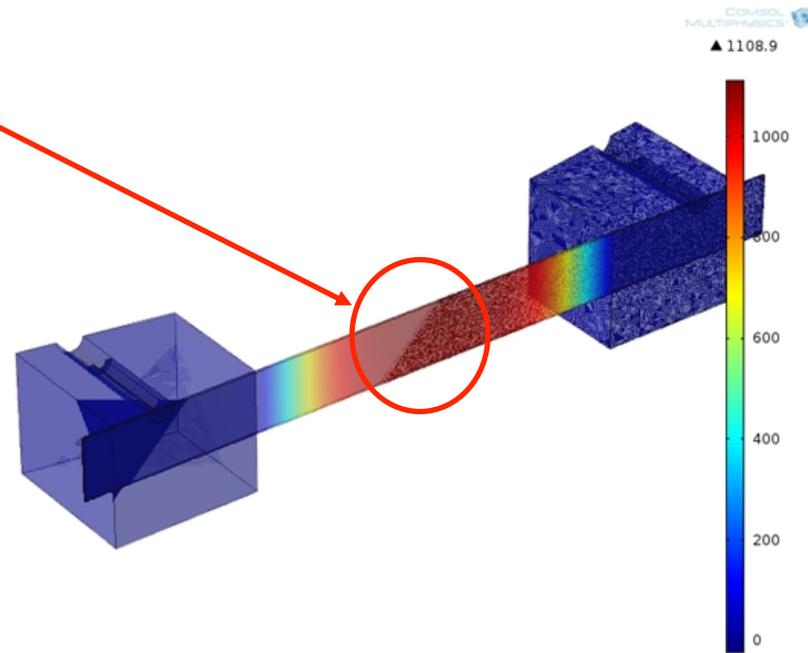
Éclairage de la zone visée
par le collimateur (22 mm)



Simulation Comsol Multiphysics® : observation du gradient de température correspondant à la zone de visée du collimateur.

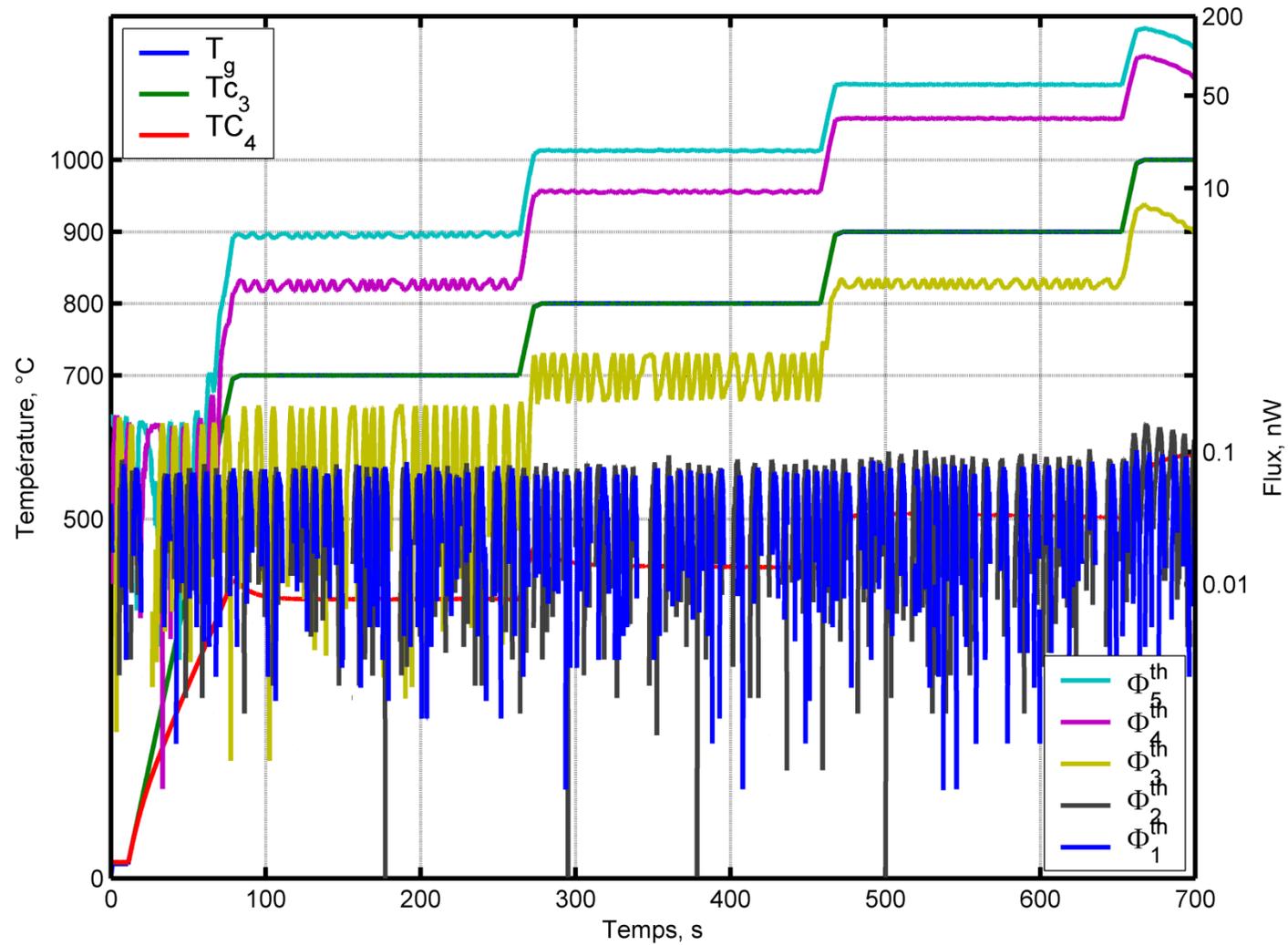


Mise en évidence du faible gradient sur la zone de visée, laquelle donne une température moyenne proche de celle que doit estimer le pyromètre.



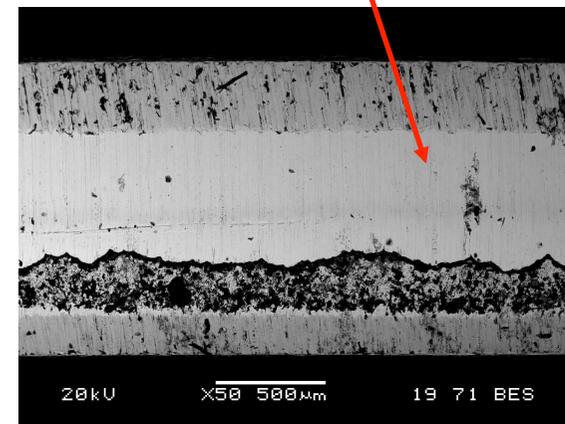
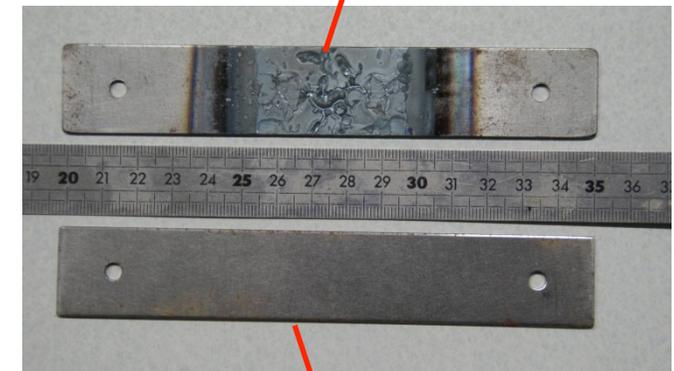
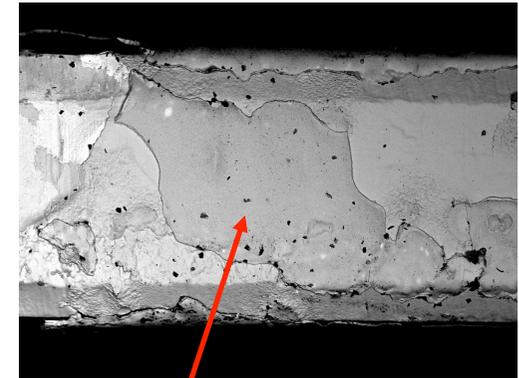
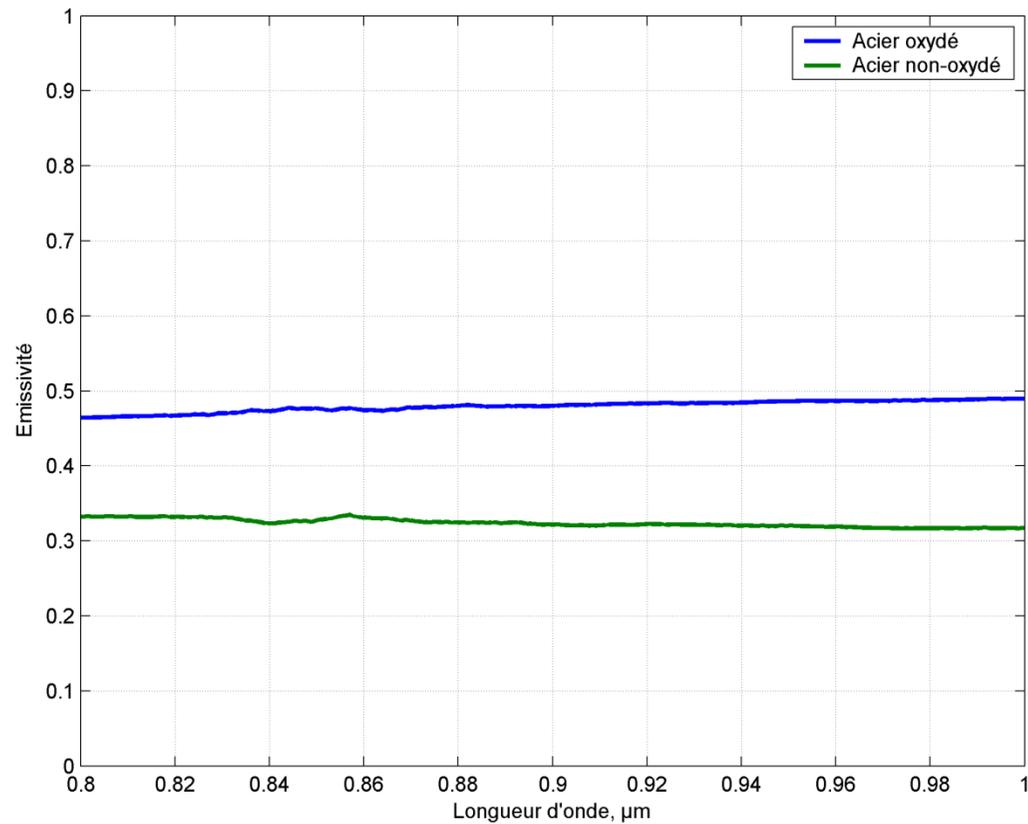
Température en °C

Analyse d'un premier essai

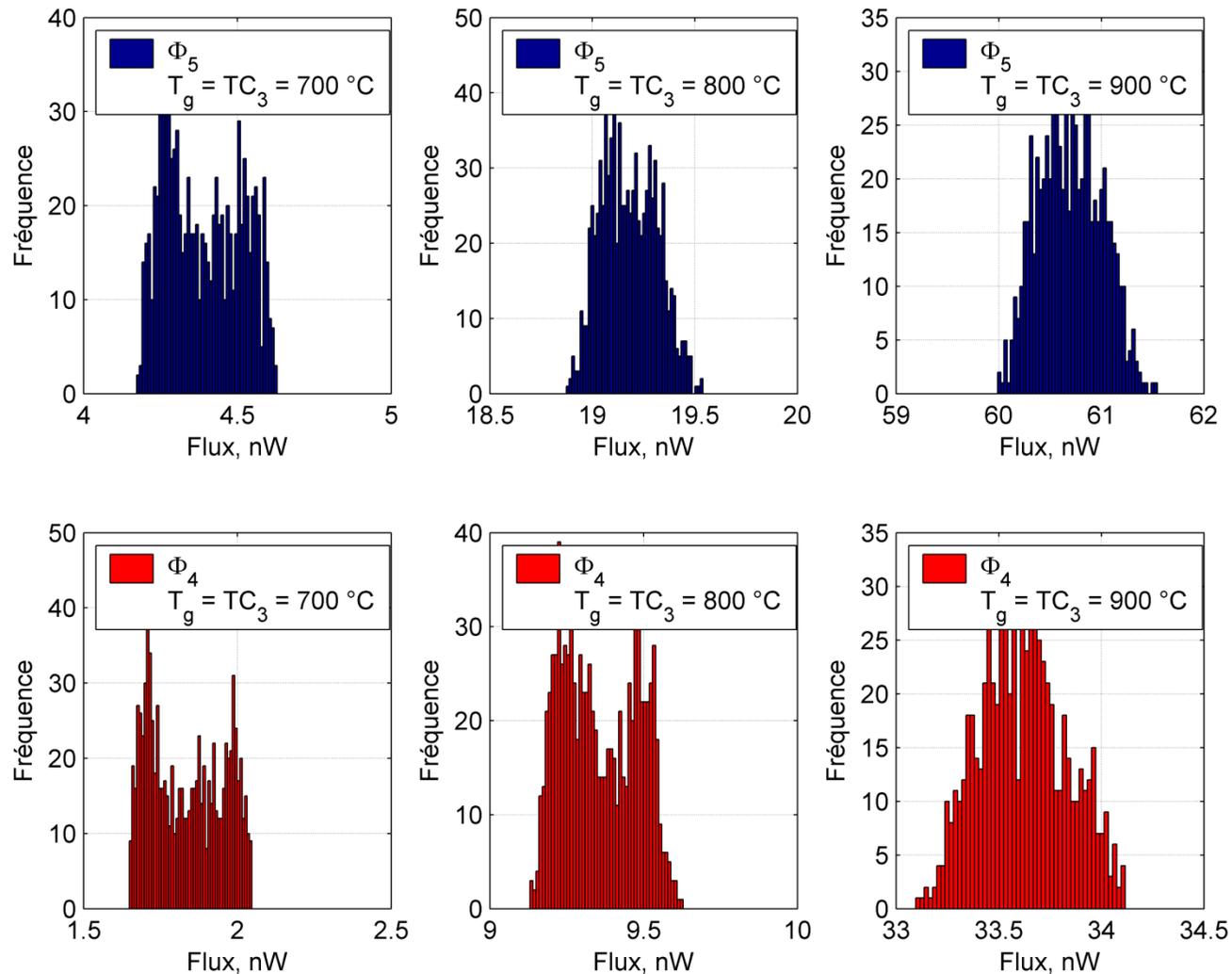


Validation de l'hypothèse du corps gris

- Mesure d'émissivité par spectroradiomètre à température ambiante.
- Imagerie par microscopie électronique à balayage.



Analyse d'un premier essai : comportement gaussien du flux en régime statique.
Paliers à 700 °C, 800 °C et 900 °C.



Température (°C)	700			800			900		
	Φ_{moy} (nW)	σ_{Φ} (nW)	erreur (%)	Φ_{moy} (nW)	σ_{Φ} (nW)	erreur (%)	Φ_{moy} (nW)	σ_{Φ} (nW)	erreur (%)
Φ_5	4,39	0.13	3.0	19,18	0,14	0,8	60,7	0,31	0,6
Φ_4	1,84	0,18	9,8	9,36	0,13	1,4	33,6	0,22	0,7
Φ_5/Φ_4 expérimental	2,38			2,05			1,80		
Φ_5/Φ_4 théorique	2,68			2,33			2,06		
Analyse du premier essai : estimation des erreurs et comparatif avec les flux théoriques									

- Différence entre les flux théoriques et expérimentaux constante et de l'ordre de 10 %.
- Nécessité d'un étalonnage à l'aide d'un corps noir !

Analyse d'un second essai : estimation de la température en bichromatique.

Variation du flux due à une variation de l'émissivité ?

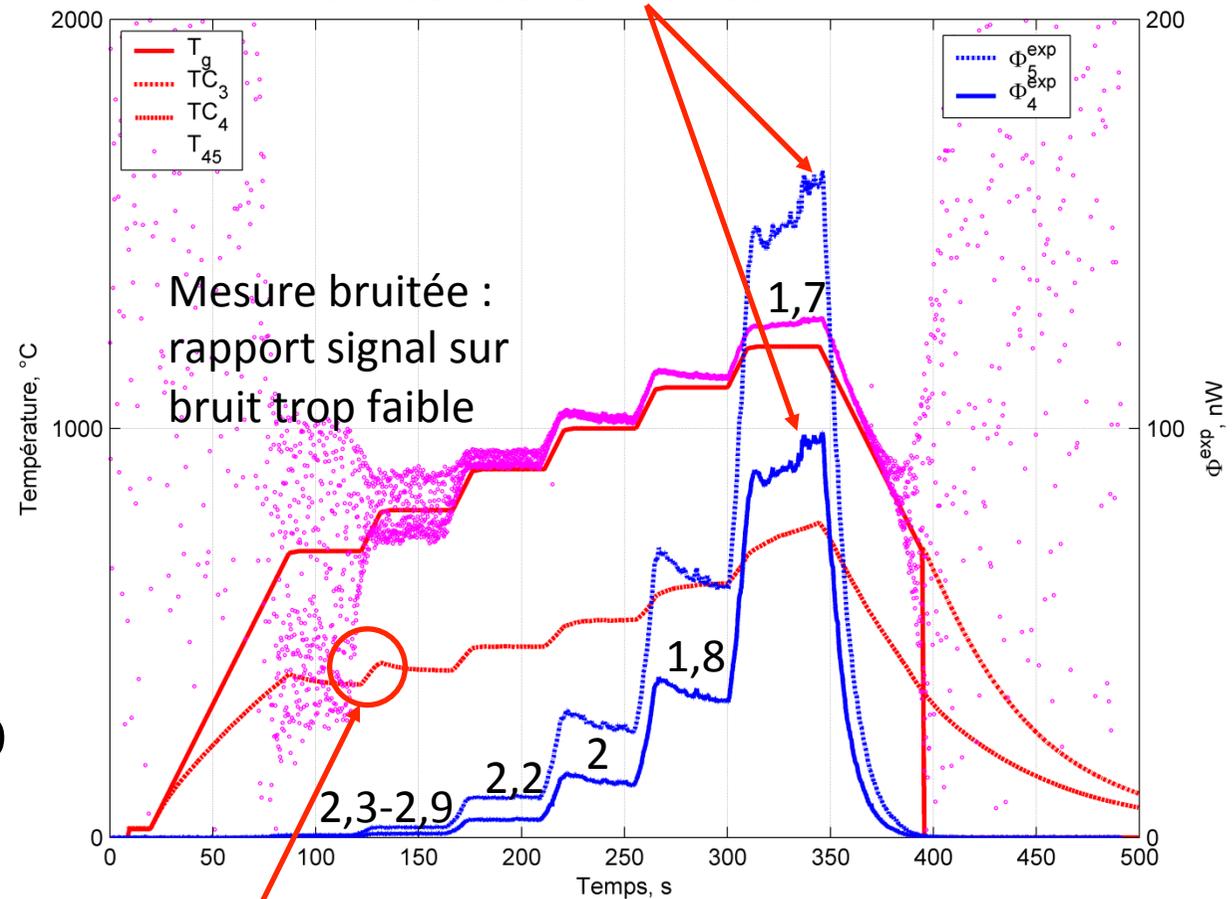
Deux longueurs d'onde :

- $\lambda_4 = 850 \text{ nm}$
- $\lambda_5 = 940 \text{ nm}$
- T_g consigne Gleeble®
- 100 ms

Obtention de T_{45} :

$$\frac{\Phi_5^{\text{exp}}}{\Phi_4^{\text{exp}}} - G_{45} \frac{\Phi_5^{\text{th}}(T_{45})}{\Phi_4^{\text{th}}(T_{45})} \rightarrow 0$$

$$\text{avec } \Phi_i^{\text{th}} = \frac{1}{2\delta\lambda_i} \int_{\lambda_i - \delta\lambda_i}^{\lambda_i + \delta\lambda_i} G_i H_{\lambda_i} \Phi_{\lambda}^c d\lambda$$



Analyses :

- Premiers résultats encourageants !
- Problèmes d'émissivité liés à l'oxydation et de tenue des thermocouples.
- Bonne réactivité des détecteurs en régime dynamique.
- Connaissance de la fonction de transfert spectrale du banc pyrométrique.

Perspectives concernant la pyrométrie :

- Mesures à effectuer sous ambiance contrôlée (possible avec machine Gleeble[®] et dispositif hautes températures).
- Essais avec d'autres métaux (tungstène...).
- Étalonnage à l'aide d'un corps noir hautes températures.
- Mesures à de plus hautes températures : utilisation des autres longueurs d'onde pour estimer l'émissivité en statique puis en dynamique.

- [1] M. Courtois *et al.*, *A complete heat and fluid flow modeling of keyhole formation and collapse during spot laser welding*, Actes du congrès ICALEO, Miami, FL, USA, 2013.
- [2] C. Rodiet *et al.*, *Optimisation of wavelengths selection used for the multi-spectral temperature measurement by ordinary least squares method of surfaces exhibiting non-uniform emissivity*, Quantitative Infrared Thermography, 2013.
- [3] Y. S. Touloukian, *Thermal radiative properties*, Plenum, New York, 1970.
- [4] T. Duvaut *et al.*, *Multiwavelength infrared pyrometry: optimization and computer simulations*, Infrared Physics & Technology 36 (1995) 1089-1103.
- [5] C. Martin *et al.*, *Mesure par thermographie infrarouge de l'émissivité de matériaux bons conducteurs de la chaleur. Influence de l'état de surface, de l'oxydation et de la température*, Revue Phys. Appl. 15 (1980) 1469-1478.
- [6] R. Siegel, J. Howell, *Thermal radiation heat transfer*, 4th Ed. Taylor & Francis, New-York, 2002.
- [7] T. Pierre, *Mesure de la température à l'échelle microscopique par voie optique dans la gamme ultraviolet-visible*, Thèse, Université de Lorraine, 2007.

Merci de votre attention.

Questions ?