



Groupe « Hautes Températures »

Caractérisation thermique à haute température

Benjamin REMY, Youssef SOUHAR, Christophe RODIET,
Vincent SCHICK & Alain DEGIOVANNI

LEMTA-UMR CNRS 7563
54 504 Vandoeuvre-Lès-Nancy Cedex

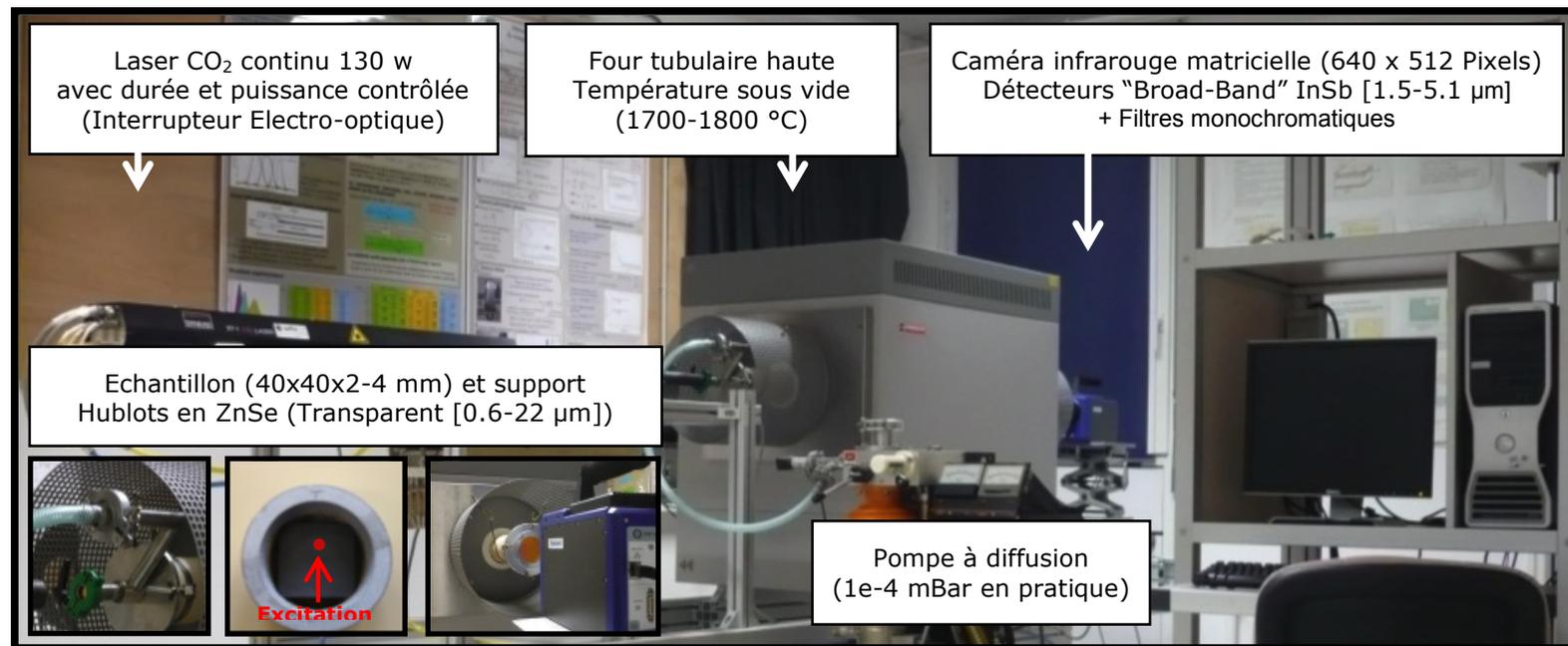
E-mail : benjamin.remy@univ-lorraine.fr

Paris, 13 Février 2014

Plate-forme de caractérisation thermique (LEMTA)

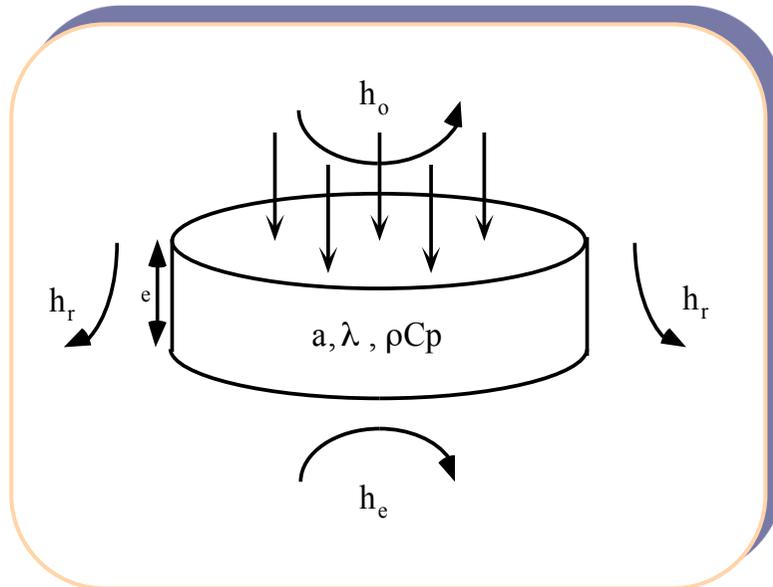
(Projet « Métallurgie » CNRS – IJL –LEMTA)

Objectif : méthodes de mesure des propriétés thermophysiques de matériaux à HT et d'isolants (solides, liquides, poudres)

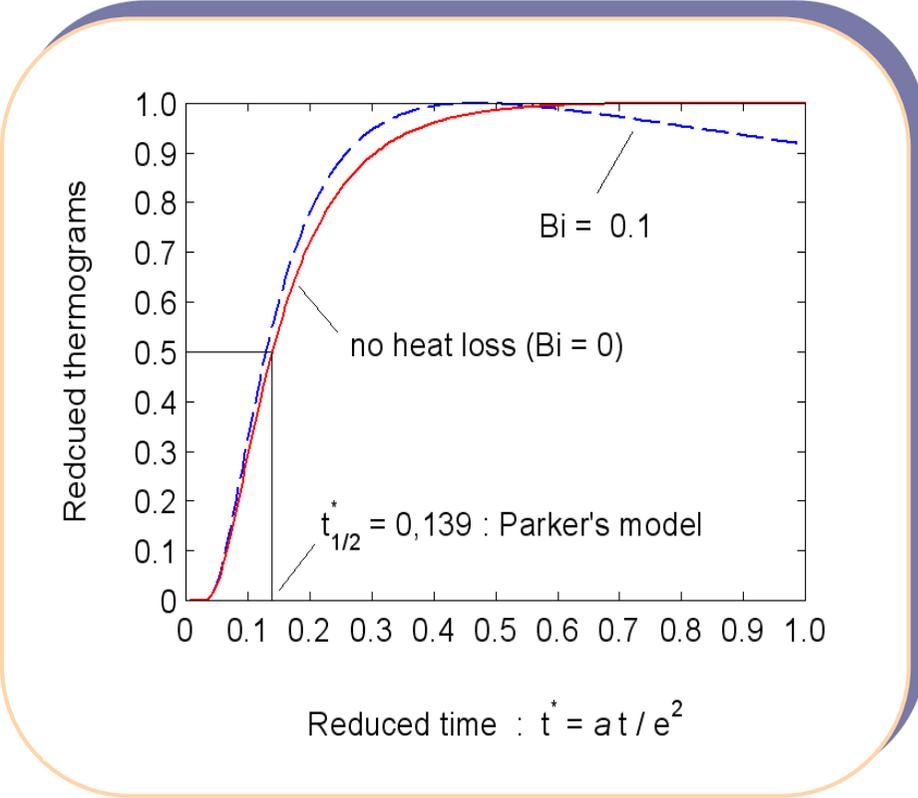


- Mise au point: banc de mesure des **diffusivités thermiques 3D** Laser CO₂ pulsé de 100W, caméra infrarouge matricielle rapide, four tunnel (**sous air : 20°C à 1100°C ; sous vide 200°C-1800°C**)

(Parker 1961)



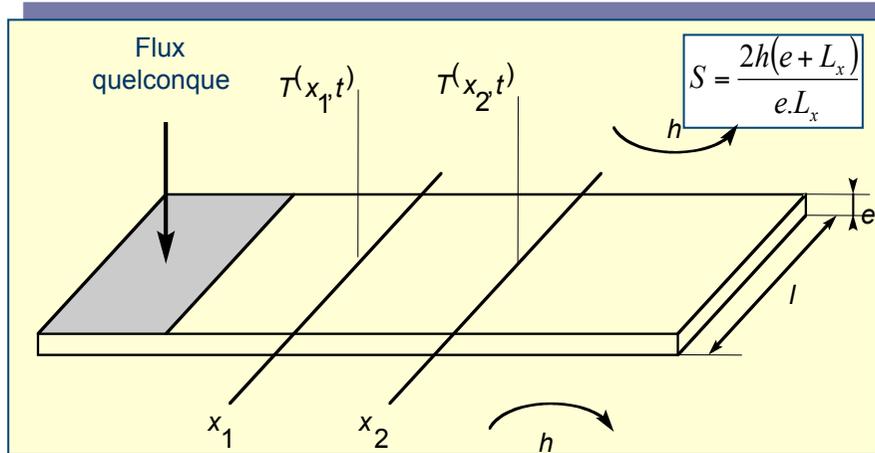
$$t_{1/2}^* = \frac{at_{1/2}}{e^2} = 0.139$$



$$T = \frac{Q}{\rho C_p e S} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \exp\left(-k^2 \pi^2 at / e^2\right) \right]$$

- Q** : énergie absorbée en face-avant
- e** : épaisseur du matériau
- a** : diffusivité thermique
- ρC_p** : capacité calorifique

Méthode de l'ailette (Hadisaroyo, 1992)



$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{S}{\lambda_x} (T - T_{ext}) = \frac{1}{a_x} \frac{\partial T}{\partial t} \quad \xrightarrow{L} \quad \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \left(\frac{p}{a_x} + \frac{S}{\lambda_x} \right) \theta$$



$$\ln^2 \left(\frac{\theta(x_2, p)}{\theta(x_1, p)} \right) = (x_2 - x_1)^2 \left(\frac{p}{a_x} + \frac{S}{\lambda_x} \right)$$



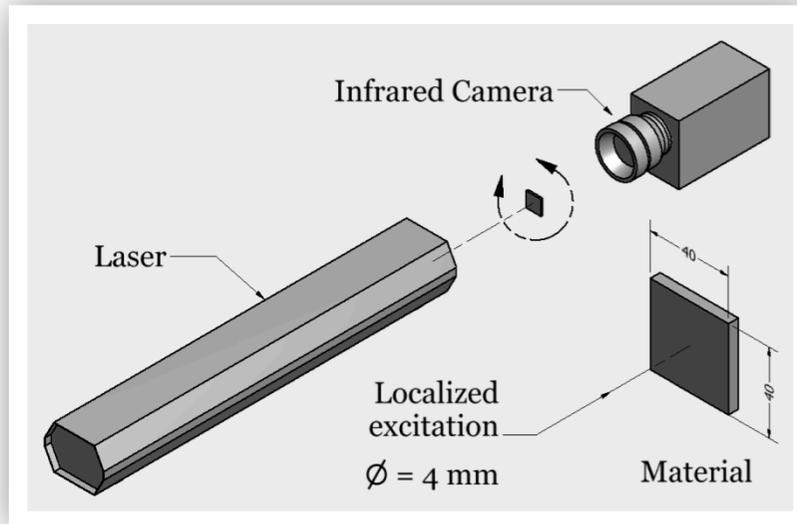
La diffusivité thermique a et les pertes h sont prises en compte

(hypothèse d'un milieu semi-infini)

Intérêt de l'utilisation d'une caméra IR:

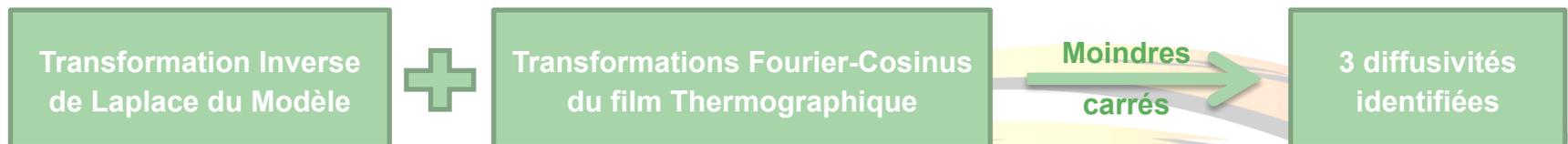
- Excitation non nécessairement uniforme en espace

Caractérisation thermique de matériaux anisotropes par méthode Flash 3D
(diffusivités dans le plan et perpendiculaire au plan)

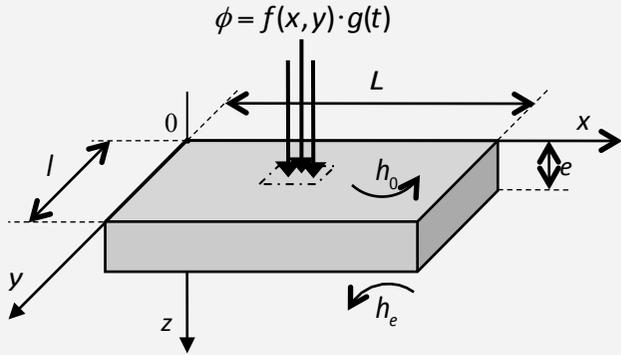


- ✓ Le matériau est stimulé par un **flux thermique de type impulsionnel** non nécessairement Dirac et de forme quelconque en espace sur sa **face avant**
- ✓ Une **caméra infrarouge** mesure les **variations de température induites** sur la **face opposée**

- ✓ **Résolution Analytique** à l'aide de **transformations Intégrales** (Laplace en temps et Fourier-cosinus en espace)
- ✓ **Estimations** réalisées directement **sur les harmoniques** dans le **domaine fréquentiel pour l'espace** mais dans le **domaine temporel**



Principe de la méthode



$$\lambda_x \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \rho c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{A } t = 0: T = T_{ext}$$

$$\text{En } z = 0: \lambda_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = h_0 \cdot (T - T_{ext}) - \phi(x, y, t) \quad \text{En } x = 0 \text{ et } x = L: \lambda_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0, L} = 0$$

$$\text{En } z = e: \lambda_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=e} = -h_e \cdot (T - T_{ext}) \quad \text{En } y = 0 \text{ et } y = l: \lambda_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0, l} = 0$$

- ✓ Transformation Intégrale adaptée au problème:

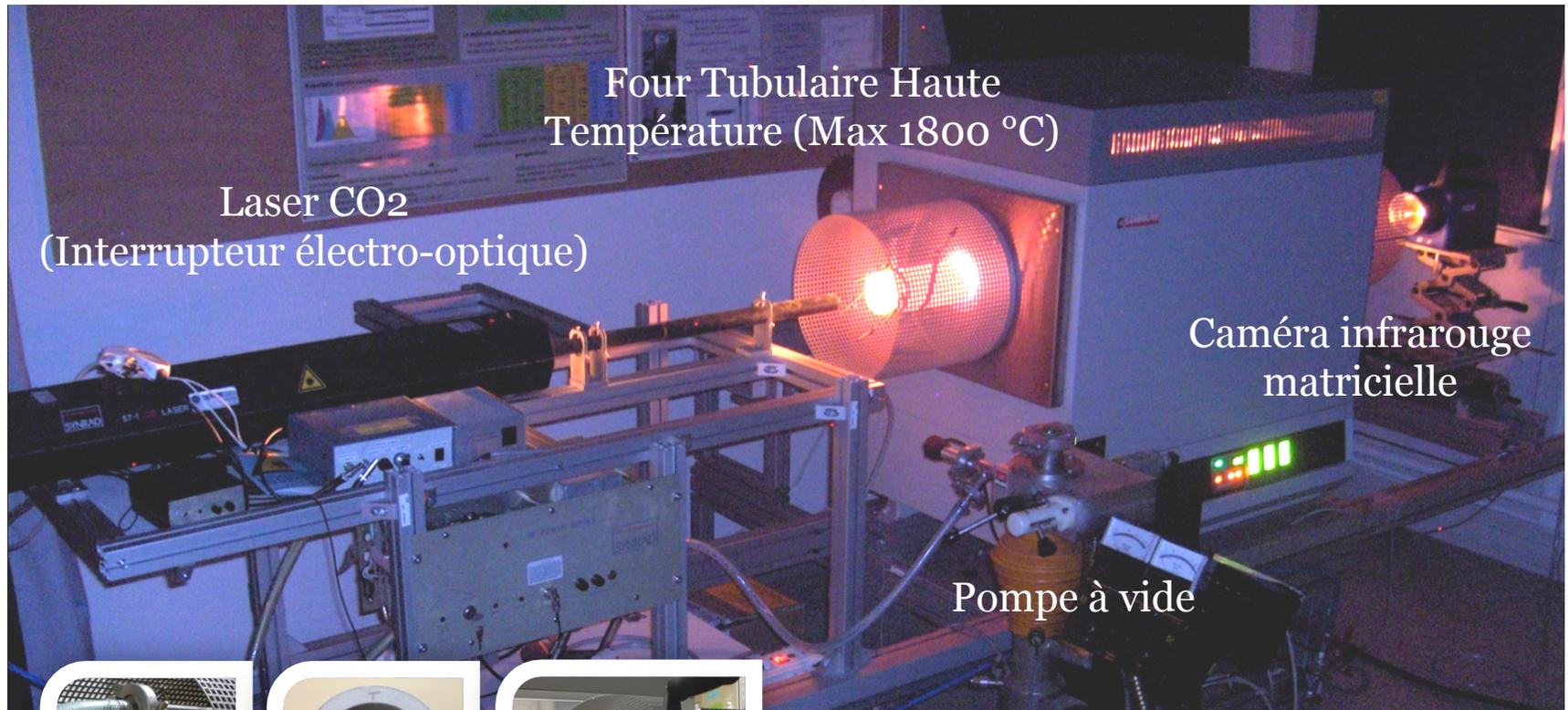
$$\Theta(\alpha_n, \beta_m, z, t) = \int_{t=0}^{+\infty} \int_{y=0}^{y=l} \int_{x=0}^{x=L} (T - T_{ext}) \cdot \cos(\alpha_n \cdot x) \cdot \cos(\beta_m \cdot y) \cdot \exp(-p \cdot t) \cdot dx \cdot dy \cdot dt$$

- ✓ En face arrière (z=e), la résolution conduit à:

$$\Theta(\alpha_n, \beta_m, z=e, p) = \frac{F(\alpha_n, \beta_m) \cdot G(p)}{[\lambda_z \cdot \gamma] \cdot sh(\gamma \cdot e) + [h_0 + h_e] \cdot ch(\gamma \cdot e) + [h_0 \cdot h_e / (\lambda_z \cdot \gamma)] \cdot sh(\gamma \cdot e)} \quad \text{Avec: } \gamma = \sqrt{\frac{p}{a_z} + \alpha_n^2 \cdot \left(\frac{a_x}{a_z}\right) + \beta_m^2 \cdot \left(\frac{a_y}{a_z}\right)}$$

- ✓ Dans l'espace de Fourier-Laplace, les transferts de chaleur dans les 3 directions mais également les pertes avec l'environnement se découpent ce qui rend la mesure très précise

Dispositif expérimental

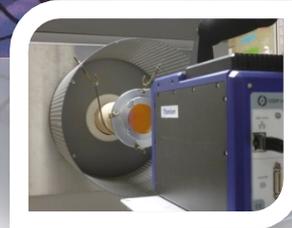


Four Tubulaire Haute
Température (Max 1800 °C)

Laser CO₂
(Interrupteur électro-optique)

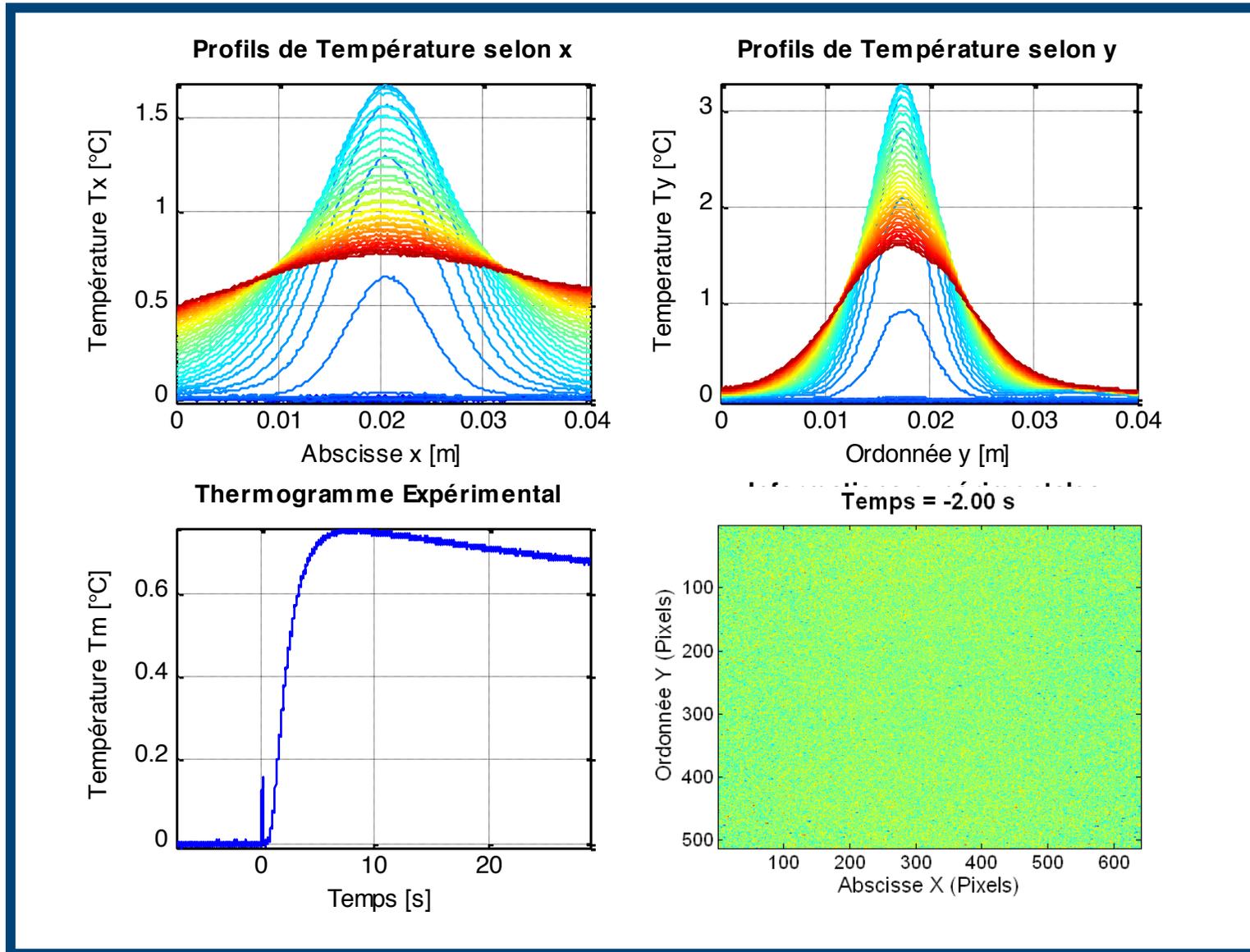
Caméra infrarouge
matricielle

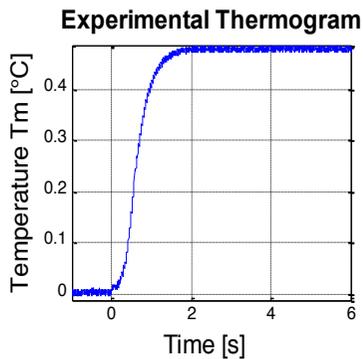
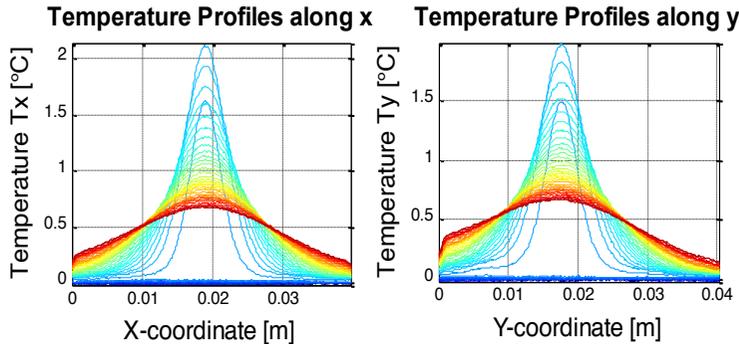
Pompe à vide



Support en céramique et hublots en
ZnSe (transparent [0.6-22 μm])

✓ Expérience sur un échantillon **anisotrope** de fibres de Carbone (Rapport d'anisotropie =10)

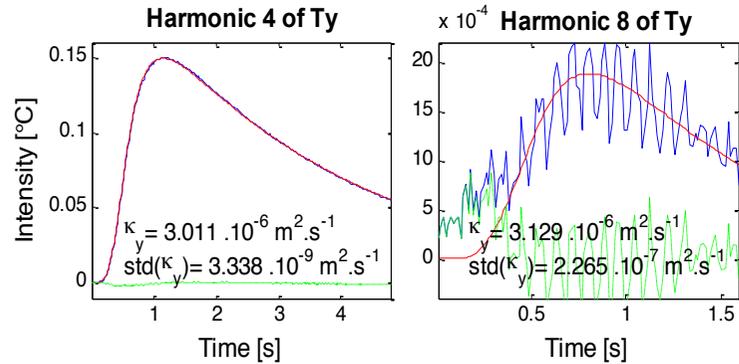




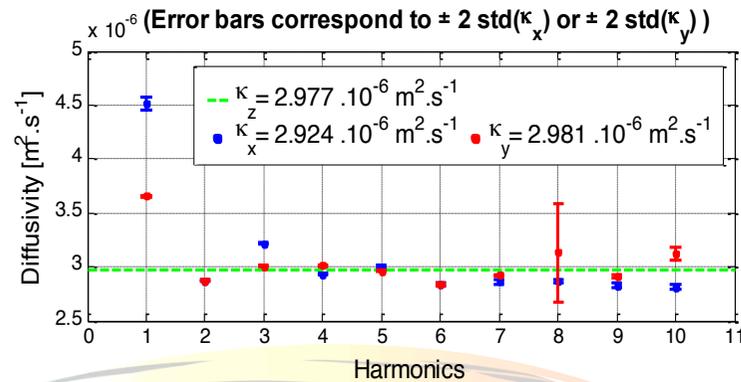
Experimental Informations

Material: Titanium
 Excitation: Laser CO₂ Beam
 Excitation Time: 346 ms
 Temperature: 20 °C
 Pressure: 7 mBar
 Lx = 39.76 mm
 Ly = 40.28 mm
 LZ = 2.98 mm

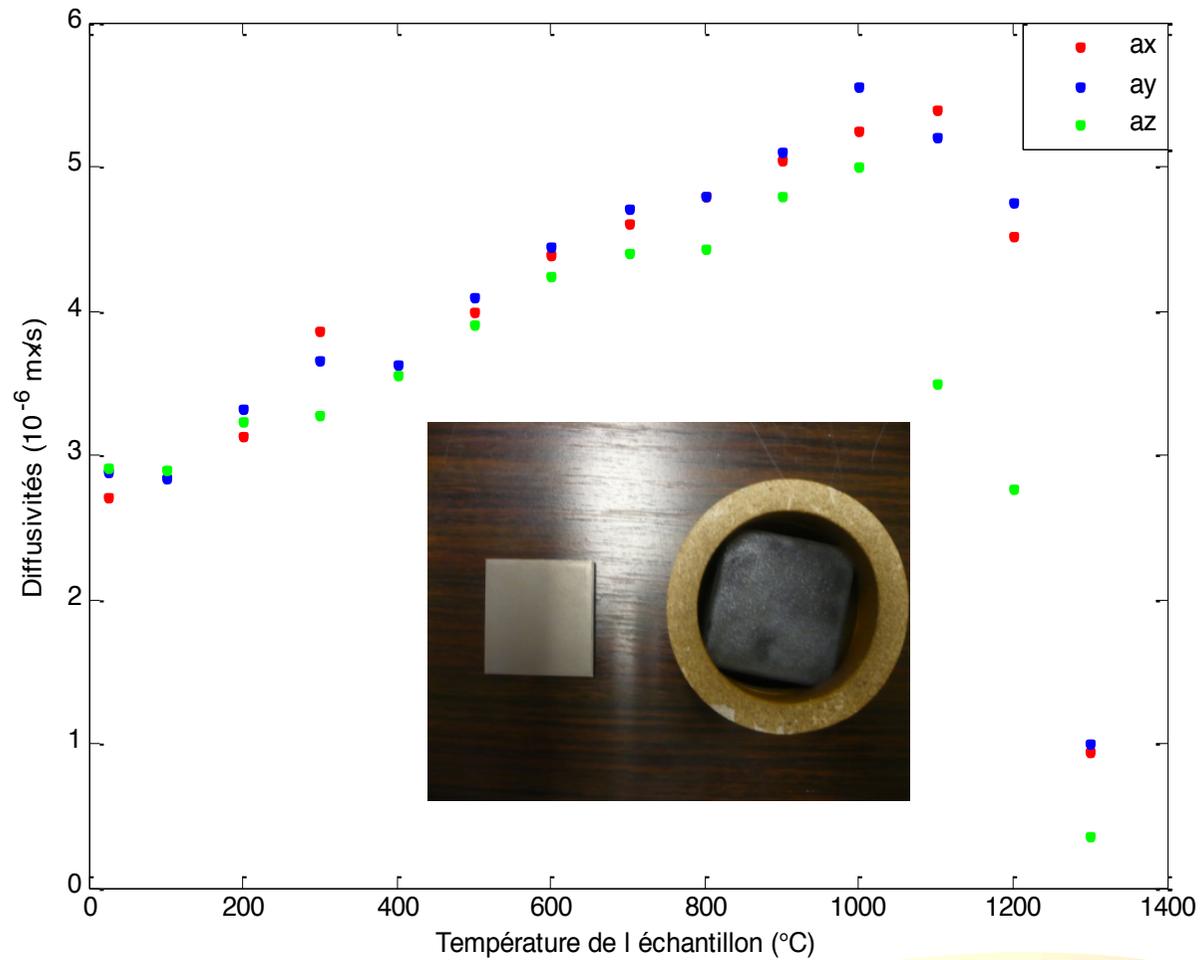
Profils de température et Thermogramme 1D



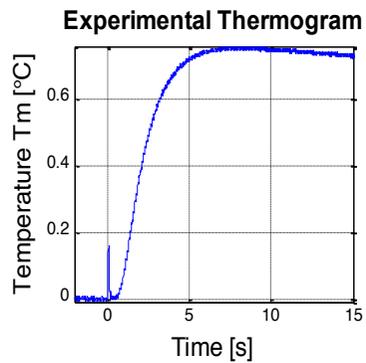
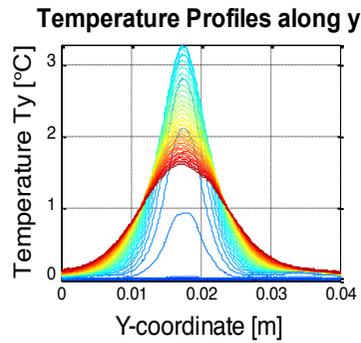
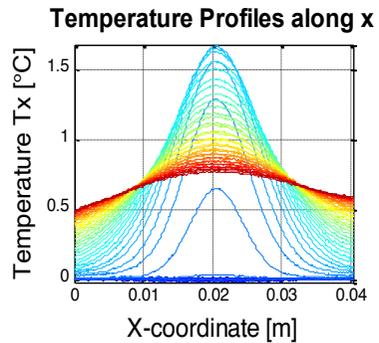
Estimation de la diffusivité thermique à partir des harmoniques spatiales



Diffusivité thermique en fonction des harmoniques



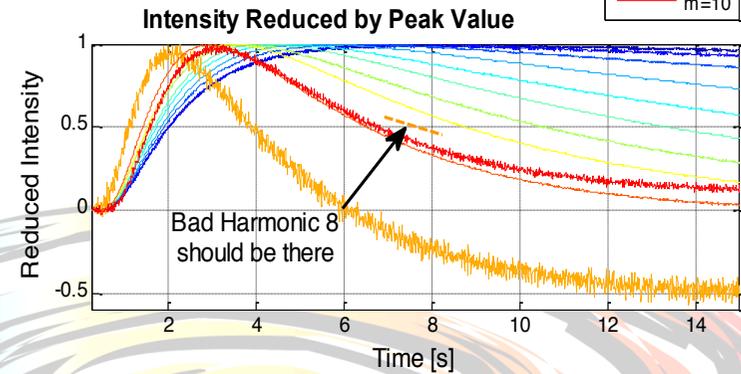
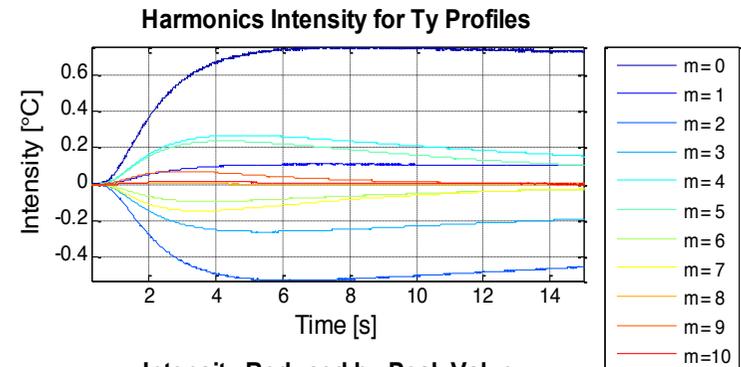
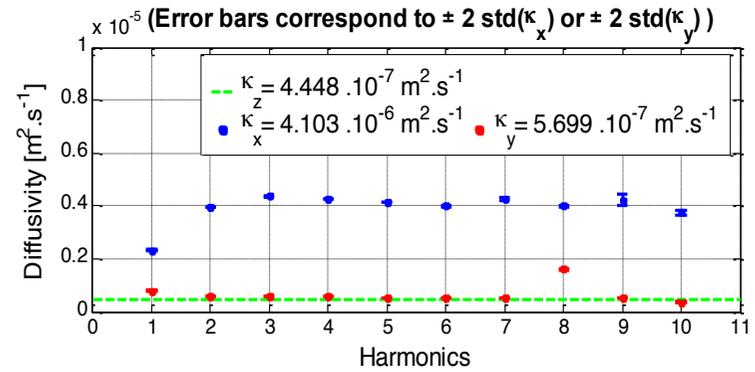
Diffusivité thermique en fonction de la température

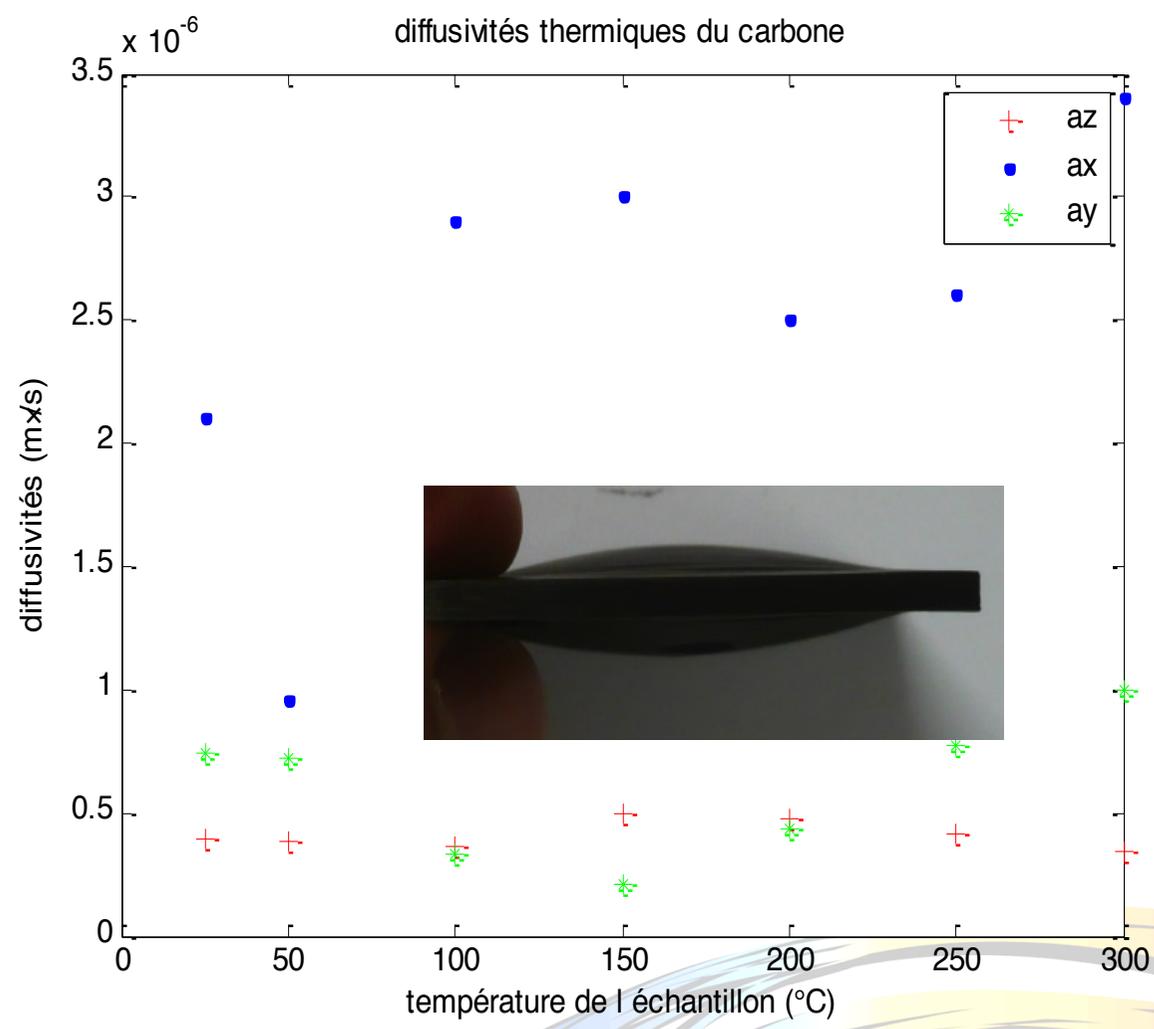


Experimental Informations

Material: Monolithic Carbide
 Excitation: Laser CO₂ Beam
 Excitation Time: 121 ms
 Temperature: 20 °C
 Pressure: 2 · 10⁻⁴ mBar
 Lx = 40.37 mm
 Ly = 40 mm
 Lz = 2.55 mm

(m ² .s ⁻¹)	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
κ_z	4.41 · 10 ⁻⁷	4.46 · 10 ⁻⁷	4.44 · 10 ⁻⁷	1.52 · 10 ⁻⁹
κ_x	4.10 · 10 ⁻⁶	4.33 · 10 ⁻⁶	4.19 · 10 ⁻⁶	7.32 · 10 ⁻⁸
κ_y	5.58 · 10 ⁻⁷	5.73 · 10 ⁻⁷	5.66 · 10 ⁻⁷	5.28 · 10 ⁻⁹



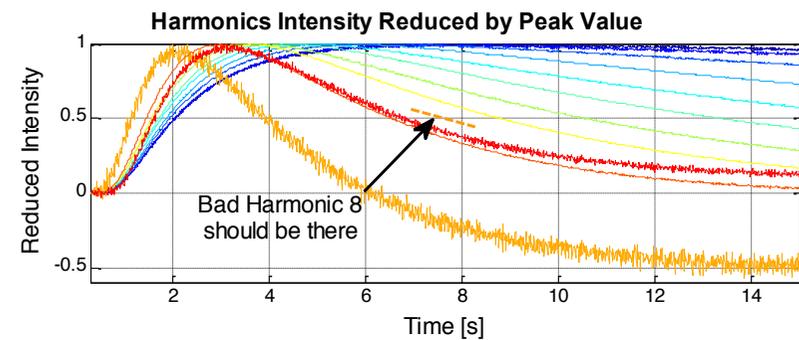
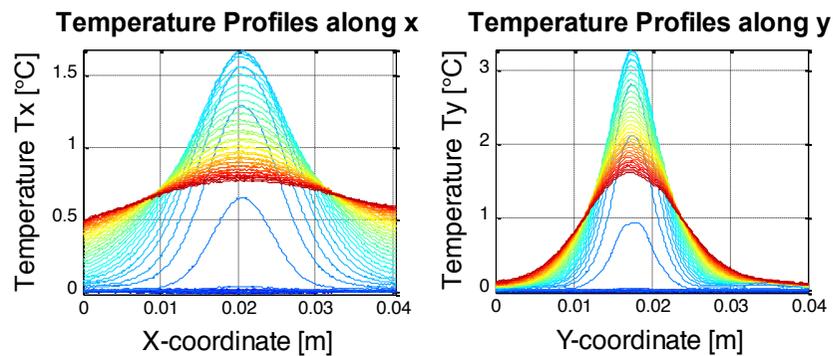


Résultats expérimentaux

✓ Validation sur un échantillon **isotrope** de Titane

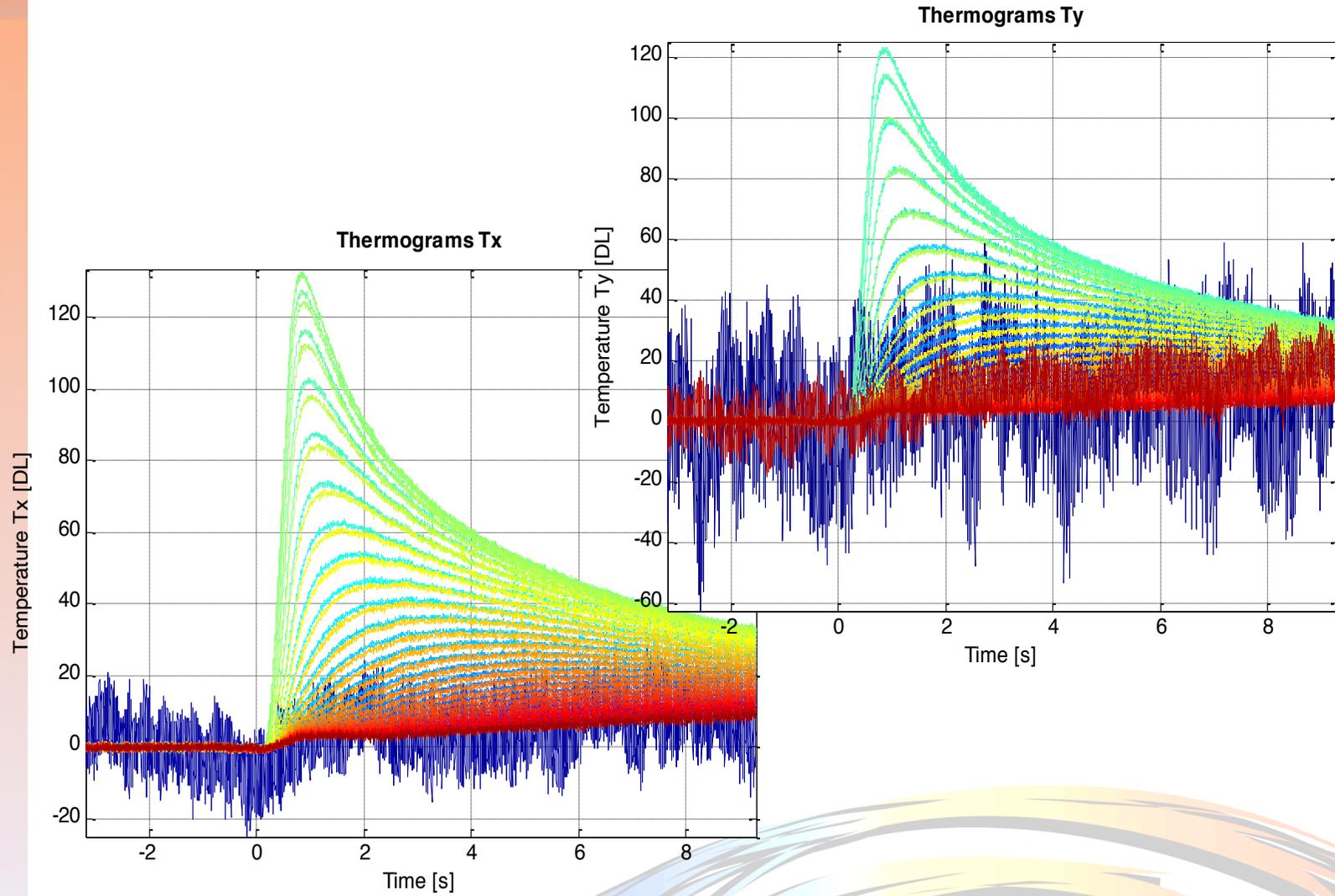
Diffusivités ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	a_z	a_x	a_y
	$2.98 \cdot 10^{-6}$	$2.92 \cdot 10^{-6}$	$2.98 \cdot 10^{-6}$

✓ Mesures sur un échantillon **anisotrope** de fibres de Carbone

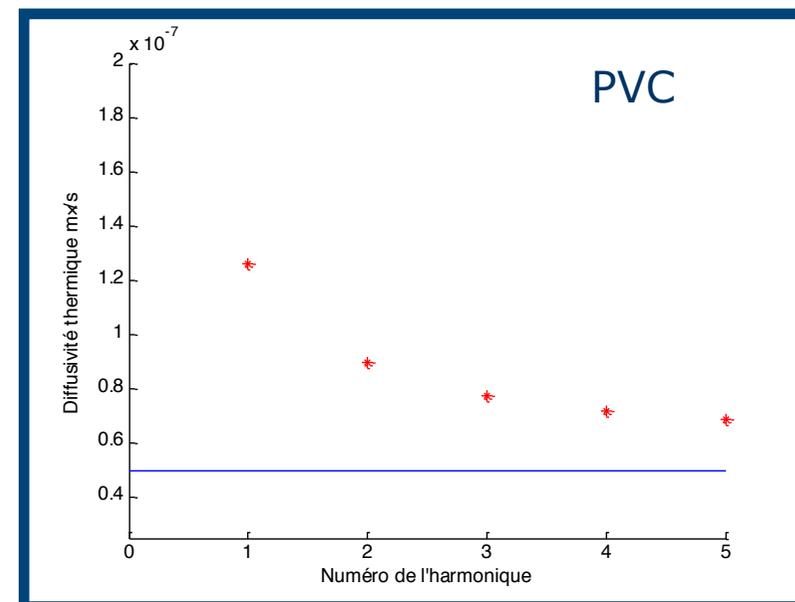
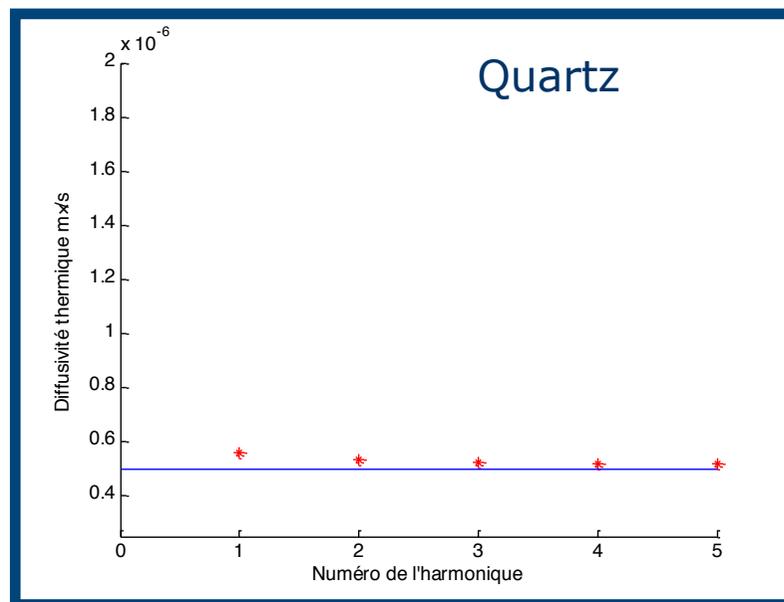


Résultats pour 7 expériences distinctes → **Mesures très reproductibles**

Diffusivités ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	a_z	a_x	a_y
Min	$4.41 \cdot 10^{-7}$	$4.10 \cdot 10^{-6}$	$5.58 \cdot 10^{-7}$
Max	$4.46 \cdot 10^{-7}$	$4.33 \cdot 10^{-6}$	$5.73 \cdot 10^{-7}$

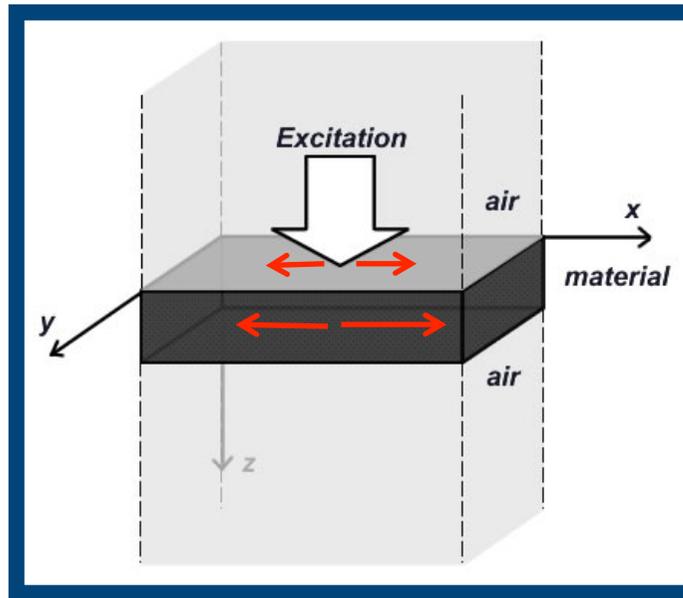


- Pas de problème avec le graphite mais problèmes avec le Quartz et PVC:



- Les diffusivités estimées dépendent de la fréquence





- Rappel : Solution obtenue dans la cas d'un modèle sans couplage

$$\Theta(\alpha_n, \beta_m, z = e, p) = \frac{F(\alpha_n, \beta_m) \cdot G(p)}{[\lambda_z \cdot \gamma] \cdot sh(\gamma \cdot e) + [h_0 + h_e] \cdot ch(\gamma \cdot e) + \left[\frac{h_0 \cdot h_e}{\lambda_z \cdot \gamma} \right] \cdot sh(\gamma \cdot e)}$$

- Tout se passe comme si on remplaçait h par :

$$h' = h + \lambda_{air} \cdot \sqrt{\frac{p}{a_{air}} + \alpha_n^2 + \beta_m^2}$$

or

$$h' = h + \lambda_{air} \cdot \sqrt{\frac{p}{a_{air}} + \alpha_n^2 + \beta_m^2} \cdot th^{-1} \left(\delta \cdot \sqrt{\frac{p}{a_{air}} + \alpha_n^2 + \beta_m^2} \right)$$

NB: variable en espace par α_n, β_n et en temps par p

$$a_{app}(k) = a \cdot \left(1 + 2 \frac{\lambda_{air}}{\lambda} \left(\frac{L_x}{e} \right) \sqrt{\left(1 - \frac{a}{a_{air}} \right) \frac{1}{k\pi}} \right)$$

→

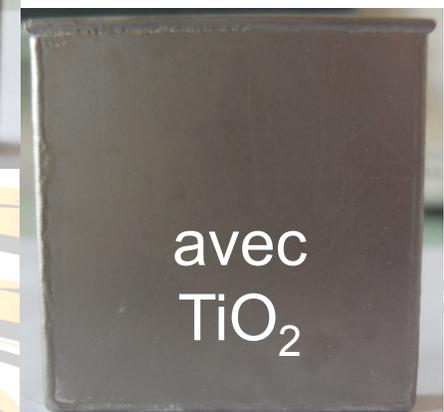
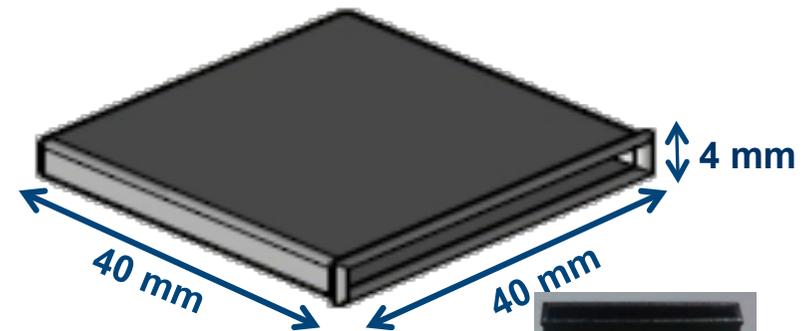
$$a_{app}(k) \approx a \cdot \left(1 + 2 \frac{\lambda_{air}}{\lambda} \left(\frac{L_x}{e} \right) \frac{1}{k\pi} \right)$$

Mesure sur les liquides



Mise en place d'une cellule de mesure spécifique

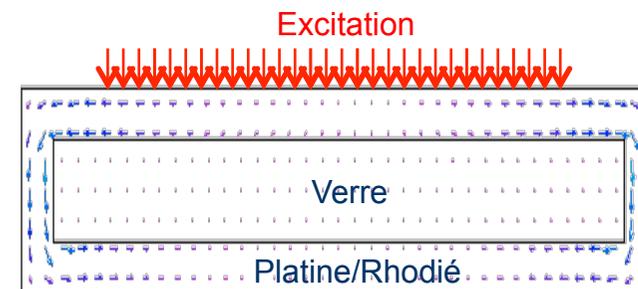
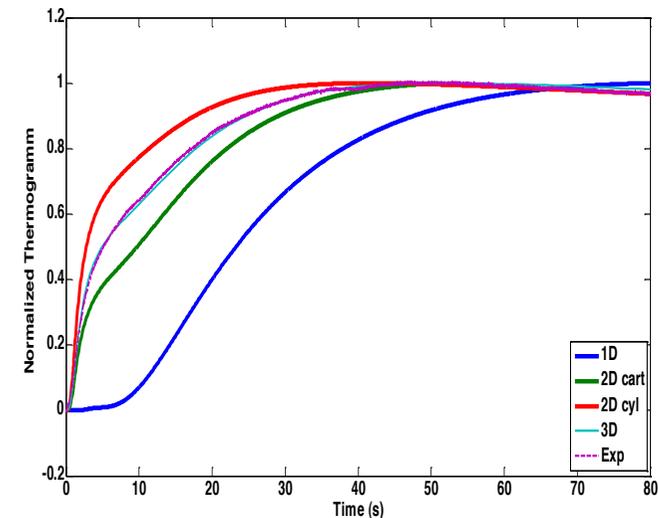
- Cellule en Platine/Rhodié (10%)
- Géométrie :
 - Parallélépipède 40*40*4 mm
 - Parois de 1 mm
- Avantages :
 - Opaque dans le visible et l'IR
 - Soudure Laser = Bon contact Thermique
 - Stabilité à HT (→ 1700°C)
 - Pas de réaction (Verre + Atmosphère)
 - Matériau bien connu (thermocouple type S)
- Inconvénients :
 - Cher (4000€/ pièce)
 - Faible émissivité et absorption à 10.6μm



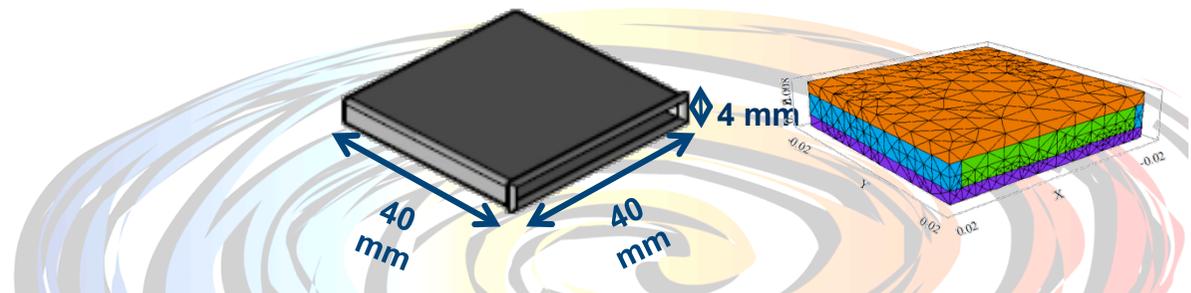
**Besoin d'un revêtement en titanium oxydé
thermiquement → TiO₂**

Modèle 3D numérique

- Une étude précédente a montré que l'épaisseur optimale de la cellule devait être de 4 mm pour 1 mm de parois. La largeur et hauteur de la cellule est de 40 mm (limitée par le diamètre du tube)
- La géométrie complexe de la cellule requiert un modèle numérique pour l'inversion (court-circuit thermique à travers les parois latérales)
- Estimation de la conductivité thermique par un modèle numérique 3D FlexPDE® et un algorithme d'optimisation Levenberg Marquardt sous Matlab



Flux de chaleur dans la cellule de mesure



Couplage radiatif

- Résolution de l'équation de la chaleur

$$\text{div}(\lambda_{ph} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}T) - \text{div}(\vec{q}_r) = \rho C_P \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)$$

$$\text{Avec } \vec{q}_r(r, t) = \int_{4\pi} L(r, \Delta) \vec{\Delta} d\Omega$$

- Résolution de l'Equation du transfert Radiatif (ETR) par une méthode (PN)

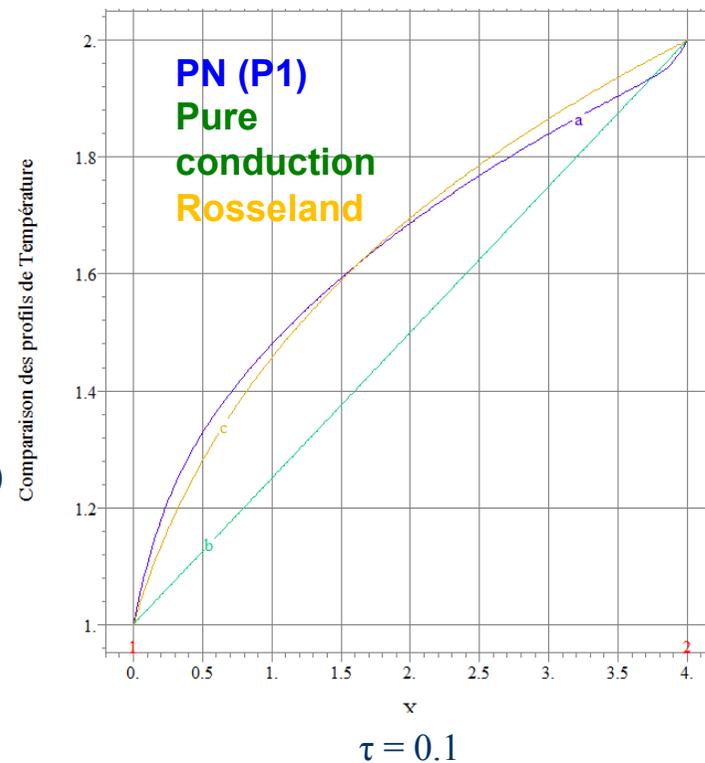
$$\frac{dL'}{ds} = -KL'(s) + KL^0(T)$$

Pertes par absorption Gain par ré-emission

- Méthode *P.N*

- Le principe de la méthode consiste à décomposer la lumiance sous forme d'harmoniques sphériques, comme somme de ces différents moments

➔ Implémentation du modèle dans FLEXPDE



1D

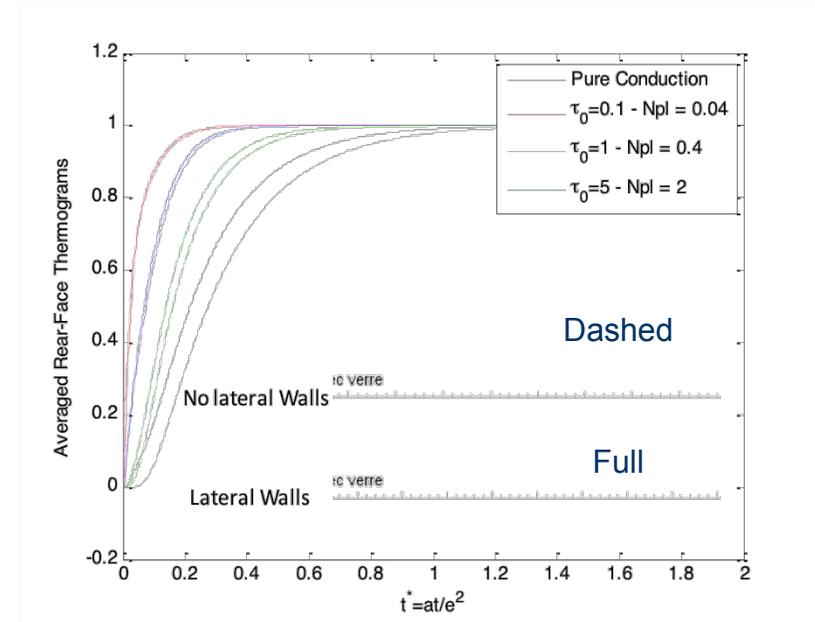
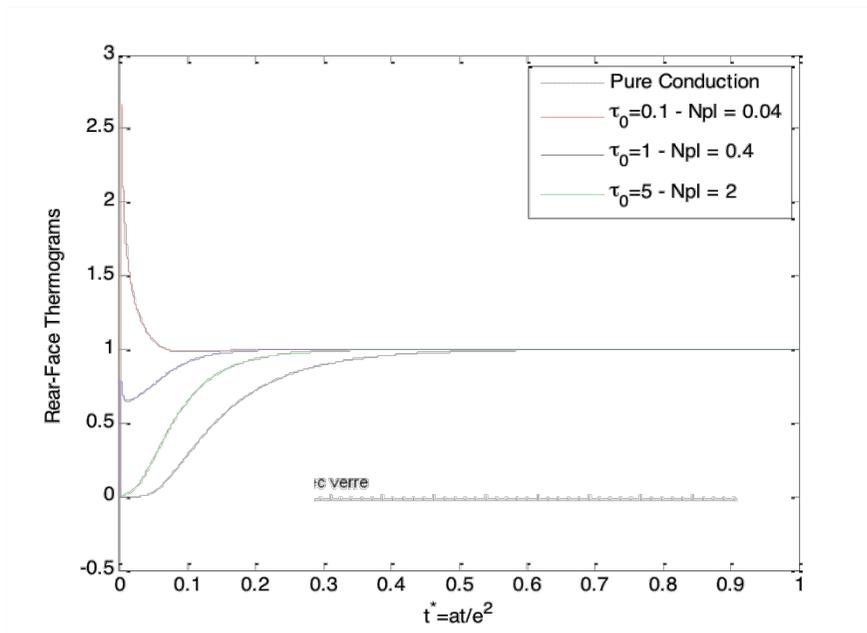


Couplage radiatif

- Simulation 1D//2D : couplage radiatif

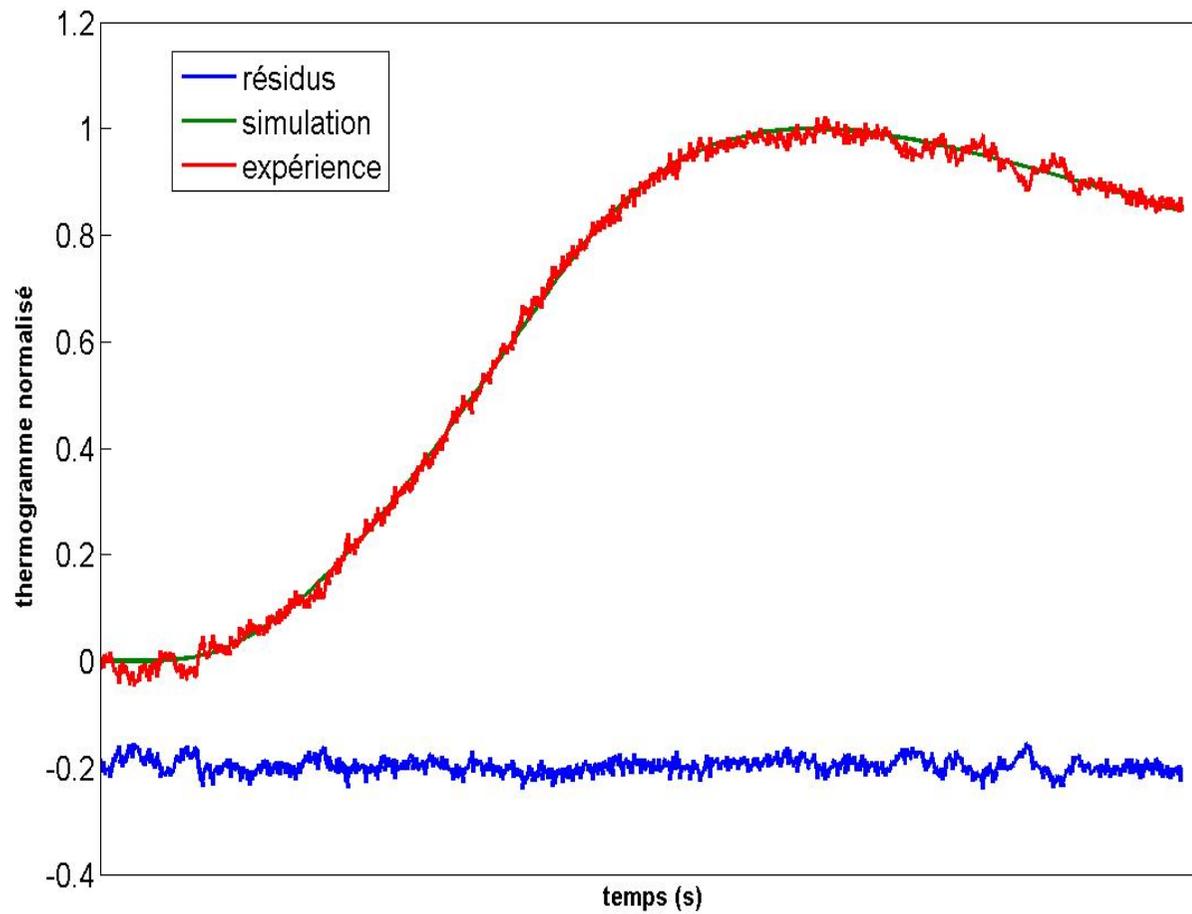
$$N_{pl} = \frac{k\beta}{4n^2\sigma T^3}$$

$$K_0 = Ke$$



Résultats préliminaires sur le verre fondu

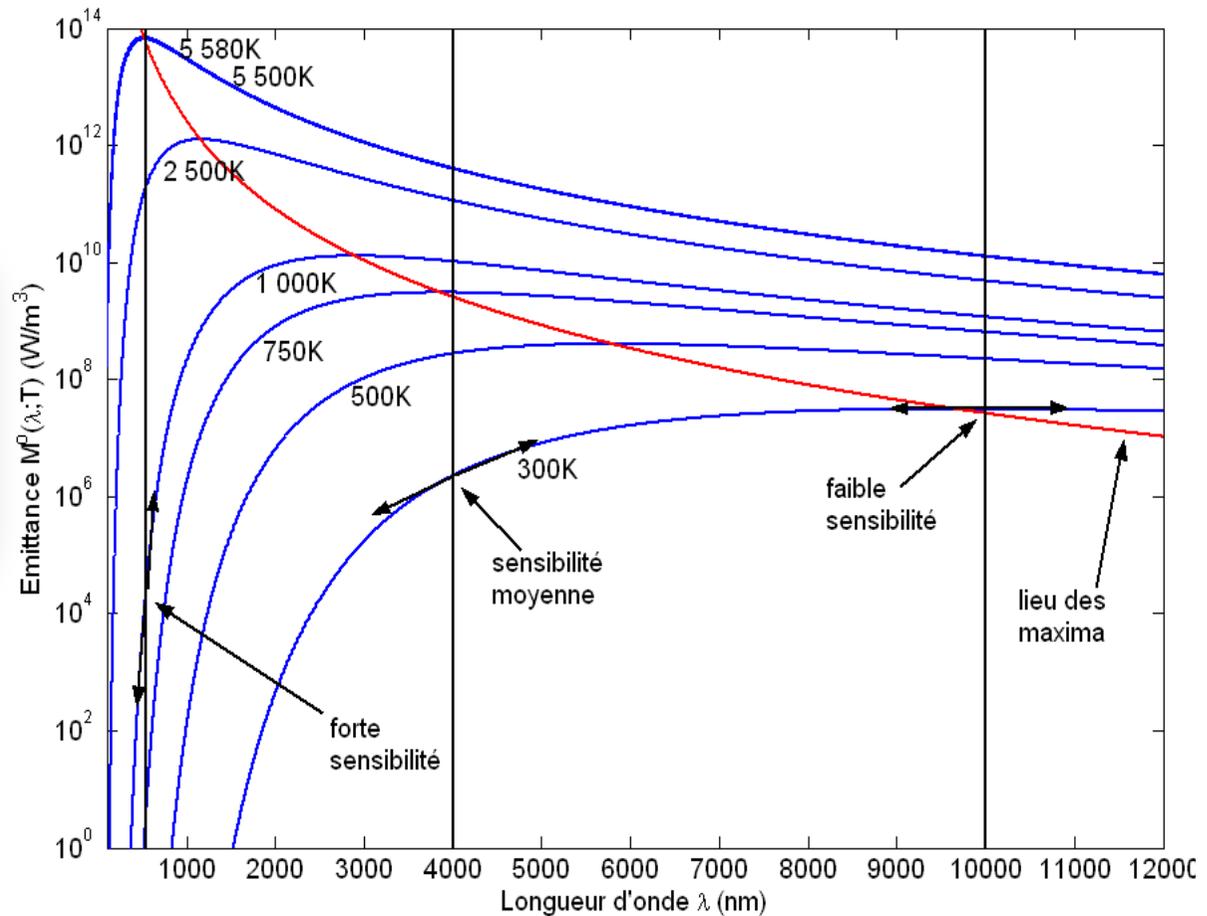
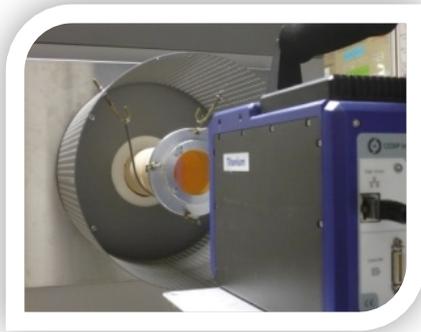
(Forte épaisseur optique)



Mesures multi-spectrales aux courtes longueurs d'onde



La mesure de **Température** par méthode optique dépend de l' **émissivité**



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

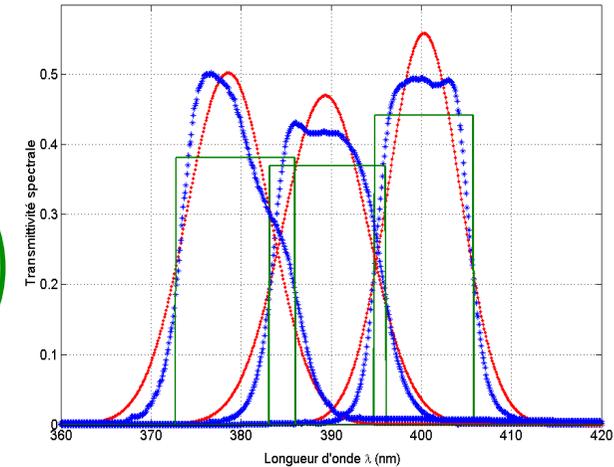
« Erreur Systématique »

- ① L'erreur augmente avec T mais diminue avec la longueur d'onde λ
- ② L'émissivité ε des matériaux augmente aux courtes Longueurs d'onde

Comment choisir les longueurs d'onde de manière optimale ?

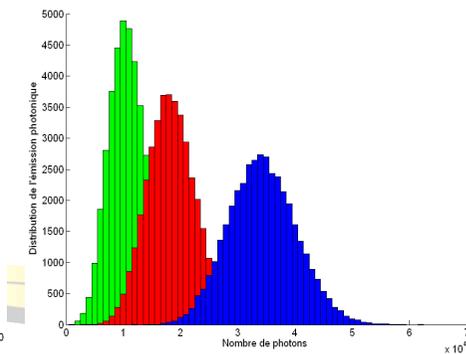
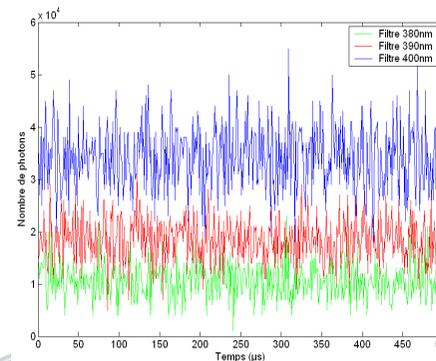
But: Ne pas amplifier l'erreur sur la température

$$\frac{e_T}{T} = \left[\frac{e_{\lambda_i}}{\lambda_i} \left| 5 - \frac{C_2}{\lambda_i T} - \frac{\lambda_i}{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{d\lambda} \right| + \frac{e_{\lambda_j}}{\lambda_j} \left| 5 - \frac{C_2}{\lambda_j T} - \frac{\lambda_j}{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{d\lambda} \right| \dots \right. \\ \left. + \frac{e_{n_{\lambda_i}}}{n_{\lambda_i}} + \frac{e_{n_{\lambda_j}}}{n_{\lambda_j}} \right] \left/ \frac{C_2}{T} \left| \frac{1}{\lambda_i} - \frac{1}{\lambda_j} \right| \right.$$



$$n_{\lambda_j}(T) = \varepsilon_{\lambda_j} k \frac{C_1 s}{hc} \tau_{\lambda_j} FT_{\lambda_j} \lambda_j^{-4} e^{-C_2/\lambda_j T}$$

$$T = \frac{C_2 (1/\lambda_j - 1/\lambda_i)}{\ln \left(\frac{\bar{n}_{\lambda_i}^r \left(\varepsilon_{\lambda_i} \frac{FT_{\lambda_j}}{FT_{\lambda_i}} \frac{\tau_{\lambda_j}}{\tau_{\lambda_i}} \frac{\delta\lambda_j}{\delta\lambda_i} \left(\frac{\lambda_j}{\lambda_i} \right)^{-4} \right)}{\bar{n}_{\lambda_j}^r} \right)}$$



Attention au caractère stochastique du flux !!!

Par exemple, pour $\lambda_i \approx \lambda_j \approx 0,4\mu m$ et $T = 1000 K$, alors : $|\lambda_i - \lambda_j| > 10nm$.

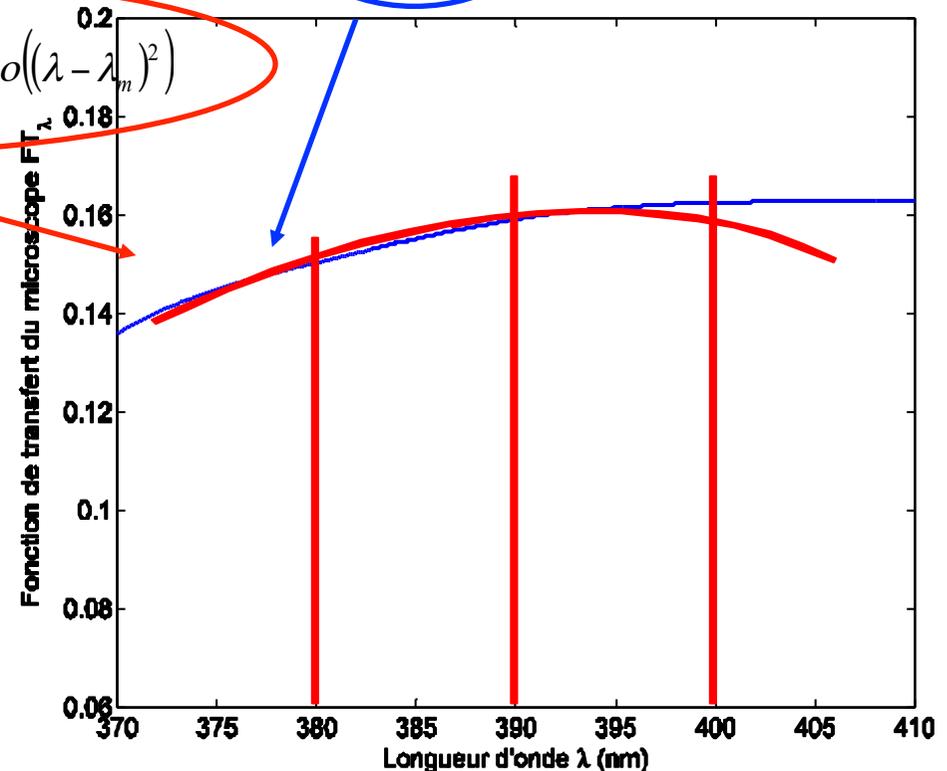
3 filtres (i,j,k)

$$T = \frac{C_2(1/\lambda_j - 1/\lambda_i)}{\ln \left(\frac{\bar{n}_{\lambda_i}^r \varepsilon_{\lambda_i} FT_{\lambda_j} \tau_{\lambda_j} \delta\lambda_j \left(\frac{\lambda_j}{\lambda_i}\right)^{-4}}{\bar{n}_{\lambda_j}^r \varepsilon_{\lambda_j} FT_{\lambda_i} \tau_{\lambda_i} \delta\lambda_i \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_j}\right)^{-4}} \right)}$$

$$f(\lambda) = f(\lambda_m) + (\lambda - \lambda_m)f'(\lambda_m) + \frac{(\lambda - \lambda_m)^2}{2} f''(\lambda_m) + o((\lambda - \lambda_m)^2)$$

$$T = \frac{C_2(1/\lambda_j - 1/\lambda_i)}{\ln \left[\left(\frac{\bar{n}_{\lambda_i}^r}{\bar{n}_{\lambda_j}^r} \right) \left(\frac{1 + (\lambda_j - \lambda_m)X + (\lambda_j - \lambda_m)^2 Y}{1 + (\lambda_i - \lambda_m)X + (\lambda_i - \lambda_m)^2 Y} \right) \left(\frac{\lambda_j}{\lambda_i} \right)^{-4} \right]}$$

$$X = f'(\lambda_m) / f(\lambda_m) \quad Y = f''(\lambda_m) / 2f(\lambda_m)$$



Originalités :

- Mesures multi-spectrales dans l'UV à l'échelle micro (Imagerie) – « Statique »
- Imagerie multi-spectrale dans l'IR (100 Hz – 4 bandes) – « Dynamique »

Objectif : Mesurer des champs de température sur des surfaces opaques réfléchissantes à haute température pour les caractériser thermiquement

Instrument de mesure: caméra infrarouge.

Difficultés : variations spatiales et temporelles de l' »émissivité" (oxydation...)

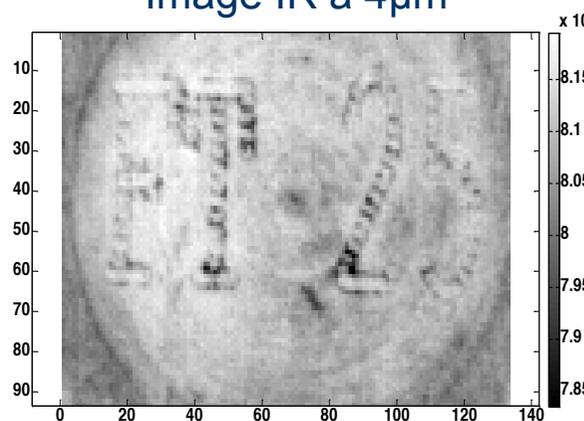
Méthode : Méthode multi-spectrale avec deux modèles différents et un critère pour choisir de façon optimale les longueurs d'onde.

Validation : Numérique et expérimentale.

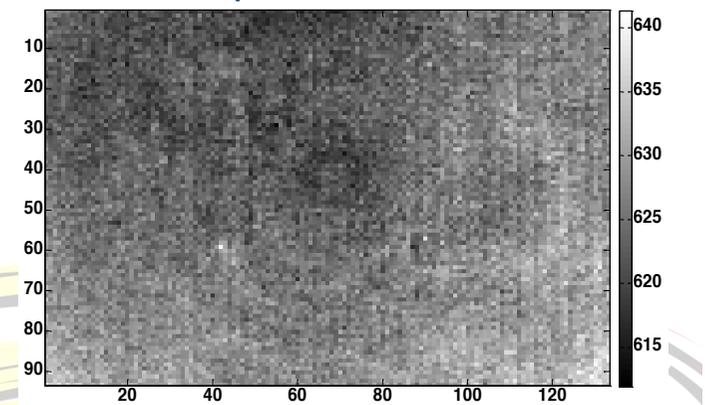
Echantillon



Image IR à 4µm



Température estimée



Méthode multi-spectrale basée sur le rapport des flux et l'approximation de Wien

Avantage : Expression analytique de l'erreur sur la température et des sensibilités => critère explicite

Inconvénient: Modèle biaisé

$$\varphi_i = \underbrace{f(\lambda_i)}_{\text{global transfer function}} \frac{C_1 \lambda_i^{-5}}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda_i T}\right) - 1}; \quad f(\lambda_i) C_1 \lambda_i^{-5} \exp\left(\frac{-C_2}{\lambda_i T}\right)$$

$$T_{ij}(X, Y) = \frac{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_j} - \frac{1}{\lambda_i} \right)}{\ln \left[\frac{\varphi_i \left(1 + (\lambda_j - \lambda_m) X + (\lambda_j - \lambda_m)^2 Y \right) \left(\frac{\lambda_j}{\lambda_i} \right)^{-5}}{\varphi_j \left(1 + (\lambda_i - \lambda_m) X + (\lambda_i - \lambda_m)^2 Y \right) \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_j} \right)^{-5}} \right]}$$

$$S(T, X, Y) = \sum_{\substack{i=1 \\ j=i+1}}^{N_f-1} (T - T_{ij}(X, Y))^2 \quad (\text{OLS} \Leftrightarrow \text{Fct coût})$$

$$f(\lambda) = f(\lambda_m) + (\lambda - \lambda_m) f'(\lambda_m) + \frac{(\lambda - \lambda_m)^2}{2} f''(\lambda_m)$$

$$X = f'(\lambda_m) / f(\lambda_m)$$

$$Y = f''(\lambda_m) / 2 f(\lambda_m)$$

Méthode multi-spectrale basée sur les flux

Avantage : Modèle non biaisé

Inconvénient : Pas d'expression simple de l'erreur sur la température

$$\varphi_i(T, a, b, c) = \frac{C_1 \lambda_i^{-5}}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda_i T}\right) - 1}, \quad \forall i \in \mathbb{N}; N_f \mathbb{A}$$

$$J(T, a, b, c) = \sum_{i=1}^{N_f} (\varphi_i^{\text{exp}} - \varphi_i(T, a, b, c))^2$$

4 longueurs d'onde

Critère de sélection des longueurs d'onde

$$T_{ij} = \frac{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_j} - \frac{1}{\lambda_i} \right)}{\ln \left[\frac{\varphi_i \varepsilon_j \left(\frac{\lambda_j}{\lambda_i} \right)^{-5}}{\varphi_j \varepsilon_i \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_j} \right)^{-5}} \right]}$$

La dérivée donne \rightarrow

$$\frac{e_T}{T} = \left[\underbrace{\left(\frac{e_{\varphi_{\lambda_i}}}{\varphi_{\lambda_i}} + \frac{e_{\varphi_{\lambda_j}}}{\varphi_{\lambda_j}} + \frac{e_{\varepsilon_{\lambda_i}}}{\varepsilon_{\lambda_i}} + \frac{e_{\varepsilon_{\lambda_j}}}{\varepsilon_{\lambda_j}} \right)}_{\text{Des flux importants}} + \frac{e_{\lambda_i}}{\lambda_i} \left| 5 - \frac{C_2}{\lambda_i T} \right| + \frac{e_{\lambda_j}}{\lambda_j} \left| 5 - \frac{C_2}{\lambda_j T} \right| \right] \bigg/ \underbrace{\frac{C_2}{T} \left(\frac{1}{\lambda_i} - \frac{1}{\lambda_j} \right)}_{\text{Terme d'amplification des erreurs}}$$

Des rapports de flux suffisants

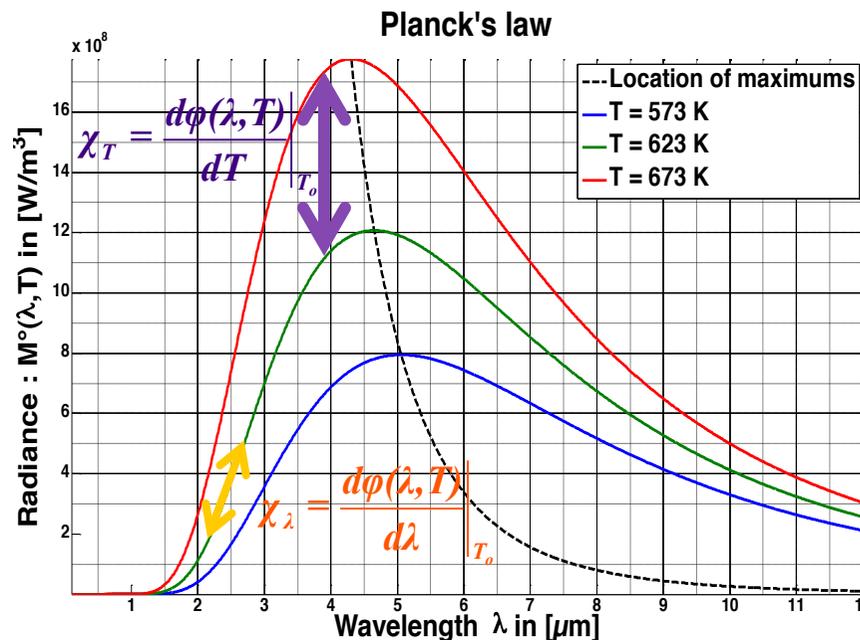
Des flux importants

$$\frac{e_{\varphi_{\lambda_i}}}{\varphi_{\lambda_i}} \pm \frac{e_{\varphi_{\lambda_j}}}{\varphi_{\lambda_j}} ; \frac{e_{\varphi_{\lambda_i}}}{\varphi_{\lambda_i}}, \quad (\varphi_{\lambda_i} \ll \varphi_{\lambda_j})$$

Terme d'amplification des erreurs

$$\frac{C_2}{T} \left(\frac{1}{\lambda_i} - \frac{1}{\lambda_j} \right) > 1$$

Comment prendre en compte le rapport signal/bruit ?



Critère de sélection des longueurs d'onde

$$\Delta\lambda = |\lambda_j - \lambda_i| > \frac{T\lambda_j^2}{C_2} \Big|_{\lambda_i < \lambda_j}$$

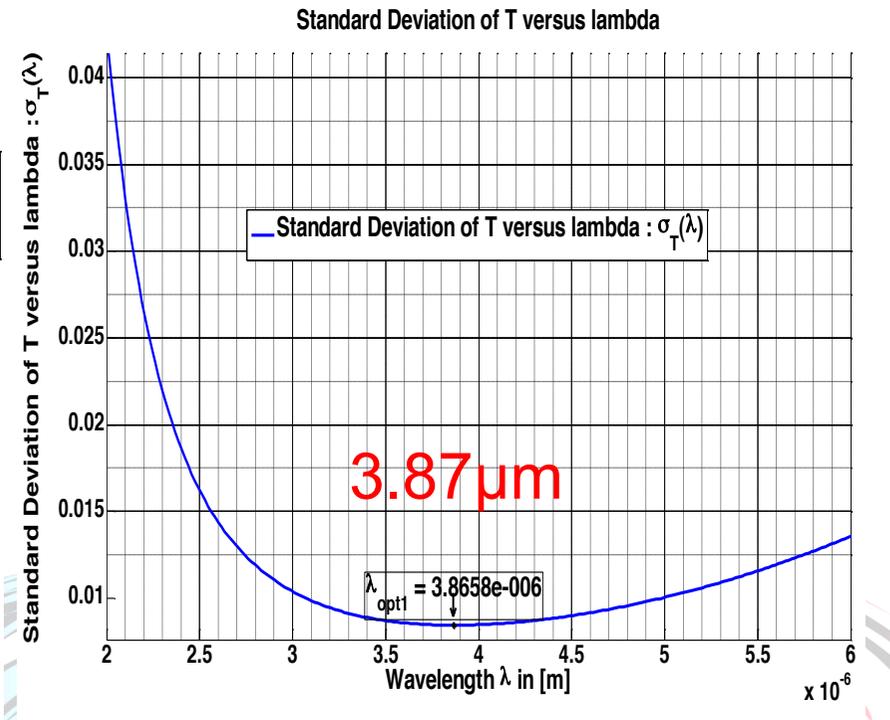
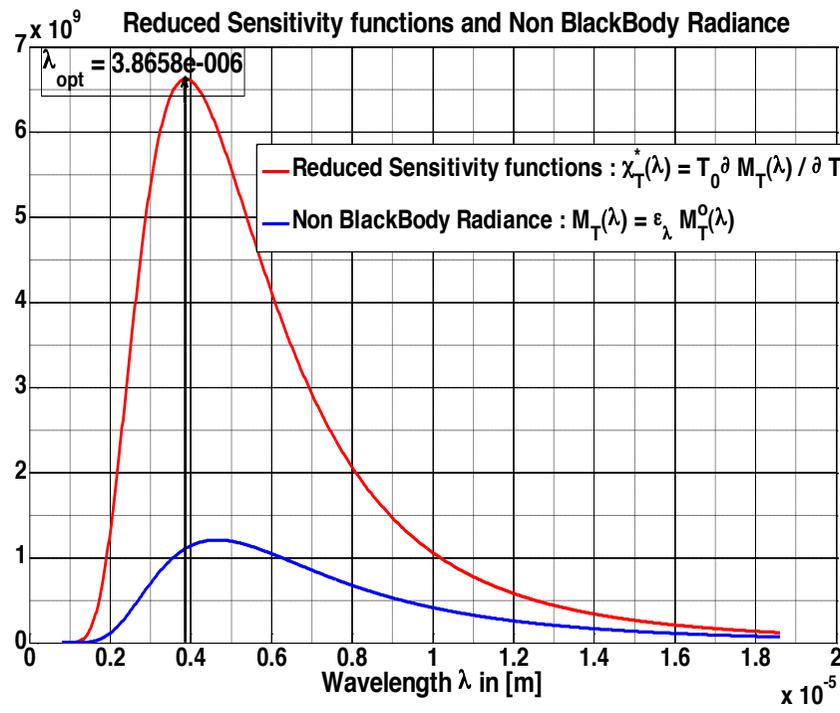
Des longueurs d'onde pas trop proches

Le premier filtre (λ_{opt1}) est choisi afin de minimiser l'écart-type sur la température estimée.

$$\varphi_T(\lambda) = \bar{\epsilon}_{cst} \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1}$$

$$X = \frac{\partial \varphi_i}{\partial \beta_j} \Big|_{T_o=623K} = \frac{\partial \varphi(\lambda_i, T)}{\partial T} \Big|_{T_o=623K} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \varphi_1}{\partial T} \\ \vdots \\ M \\ \vdots \\ \frac{\partial \varphi_N}{\partial T} \end{bmatrix} \Big|_{T_o=623K}$$

$$\sigma_T = \sqrt{\left[(X'X)^{-1} \sigma_{noise}^2 \right]_{11}}$$



Pour choisir le second filtre, on pose $\lambda_1 = \lambda_{opt1}$, on recherche la longueur d'onde (λ_{opt21}) qui minimise le rapport signal/bruit sur la température.

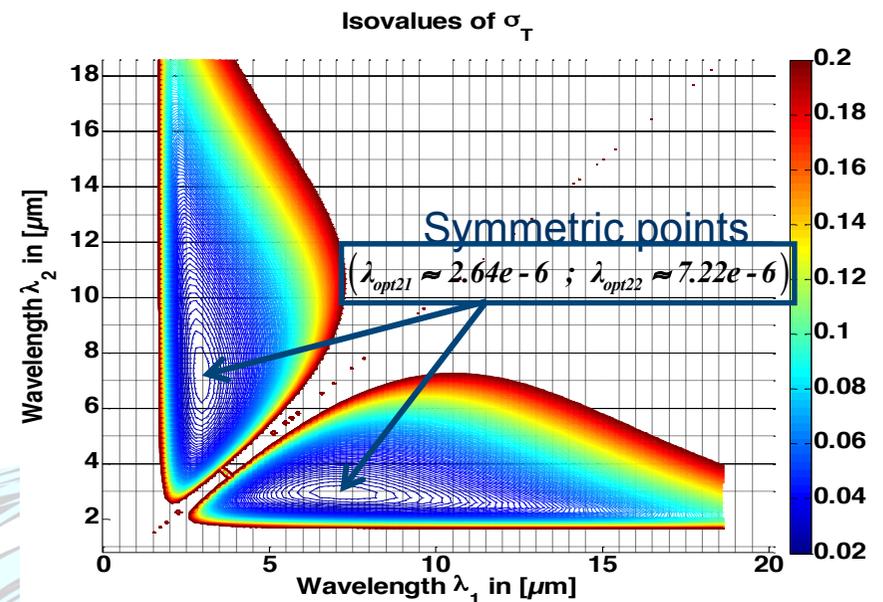
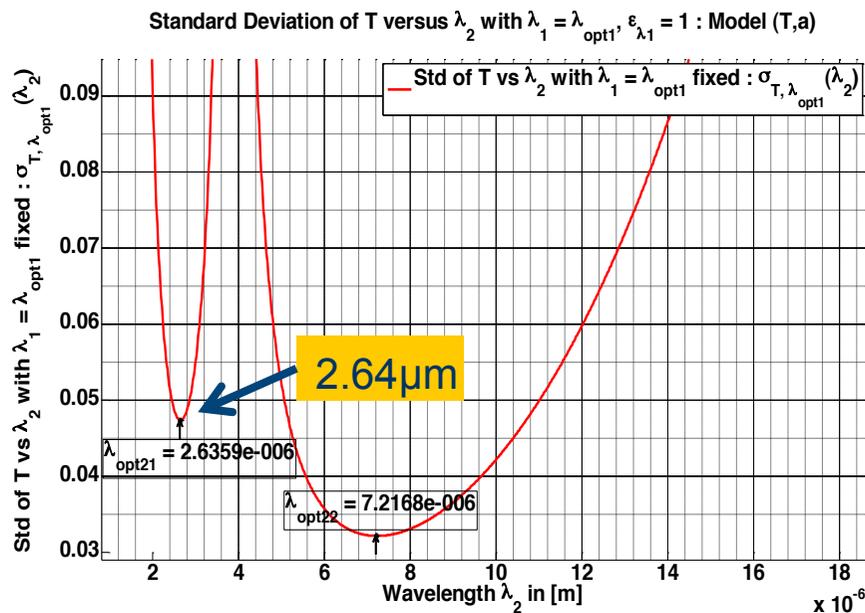
$$\varphi_{T,a}(\lambda) = a \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1}$$

$$X = \frac{\partial \varphi_i}{\partial \beta_j} \Big|_{T_o=623K} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \varphi_1}{\partial T} & \frac{\partial \varphi_1}{\partial a} \\ M & M \\ \frac{\partial \varphi_N}{\partial T} & \frac{\partial \varphi_N}{\partial a} \end{bmatrix}_{T_o=623K}$$

$$\sigma_T = \sqrt{\left[(X^t X)^{-1} \sigma_{noise}^2 \right]_{11}}$$

[2.64 μm – 3.87 μm]

[2.64 μm – 7.22 μm]



- Et ainsi de suite ...
- On obtient ainsi un jeu de "longueurs d'onde optimales":

$$\lambda_{opt} = \{2.64 ; 3.35 ; 3.58 ; 3.87\} \mu m \quad \text{and} \quad \sigma_T \approx 6 K$$

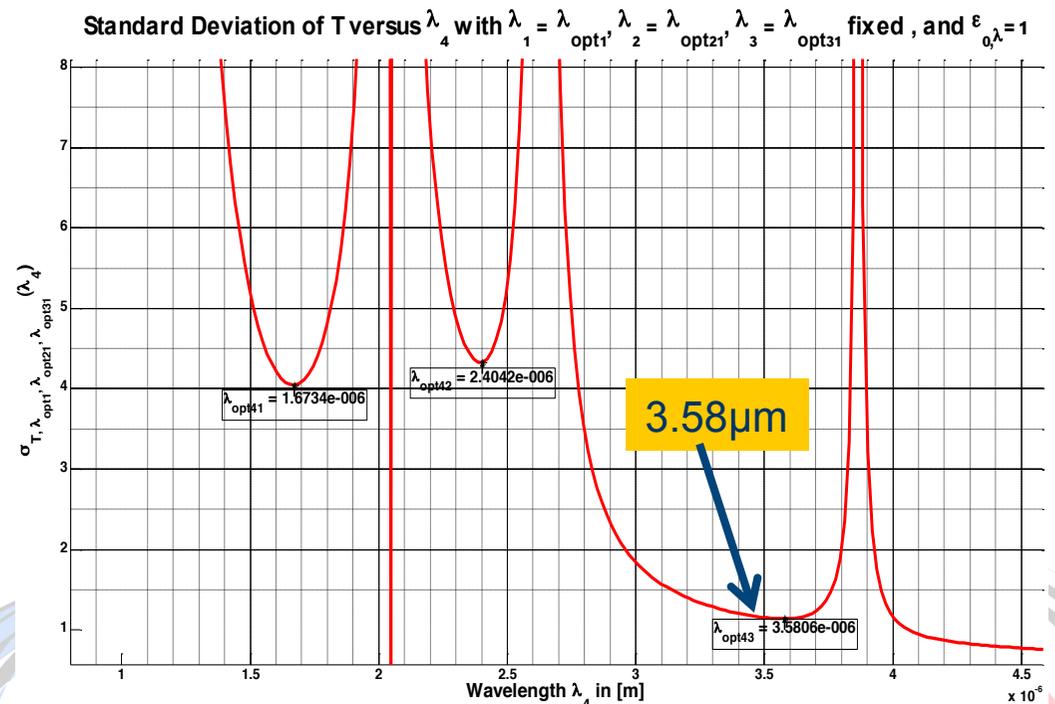
- Ces longueurs d'onde obtenues par ce processus itératif sont moins optimales que celles obtenues par une minimisation globale mais elles présentent l'avantage de minimiser la bande spectrale.
- Expérimentalement, nous avons utilisé les filtres suivants :

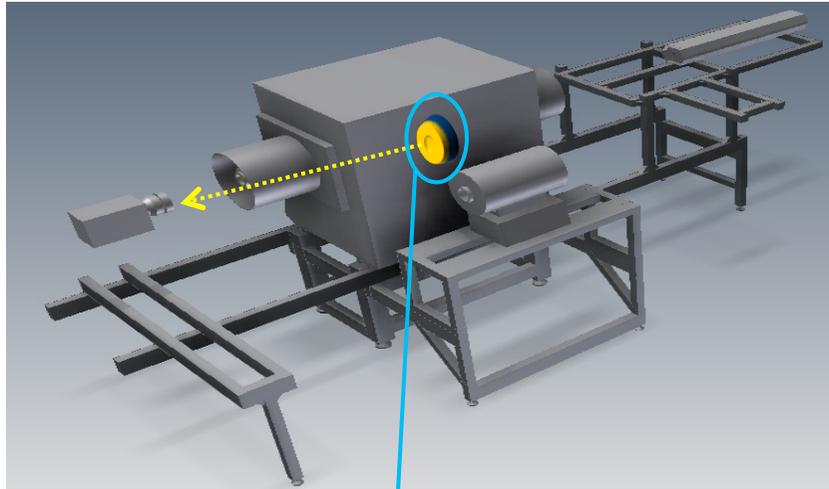
$$\lambda_{exp} = \{2 ; 2.35 ; 2.85 ; 4\} \mu m \quad \longrightarrow \quad \sigma_T \approx 2.55 K$$

$$\varphi_{T,a,b,c}(\lambda) = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{f(\lambda) \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1}$$

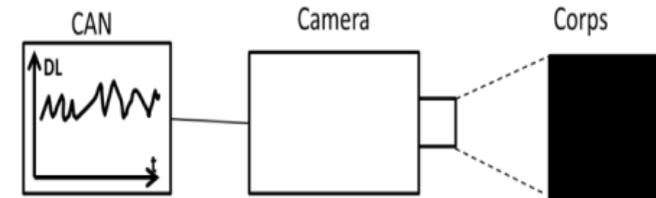
$$X = \frac{\partial \varphi_i}{\partial \beta_j} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \varphi_1}{\partial T} & \frac{\partial \varphi_1}{\partial a} & \frac{\partial \varphi_1}{\partial b} & \frac{\partial \varphi_1}{\partial c} \\ M & M & M & M \\ \frac{\partial \varphi_N}{\partial T} & \frac{\partial \varphi_N}{\partial a} & \frac{\partial \varphi_N}{\partial b} & \frac{\partial \varphi_N}{\partial c} \end{bmatrix}$$

$$\sigma_T = \sqrt{\left[(X^t X)^{-1} \sigma_{noise}^2 \right]_{11}}$$





Echantillon (visible)

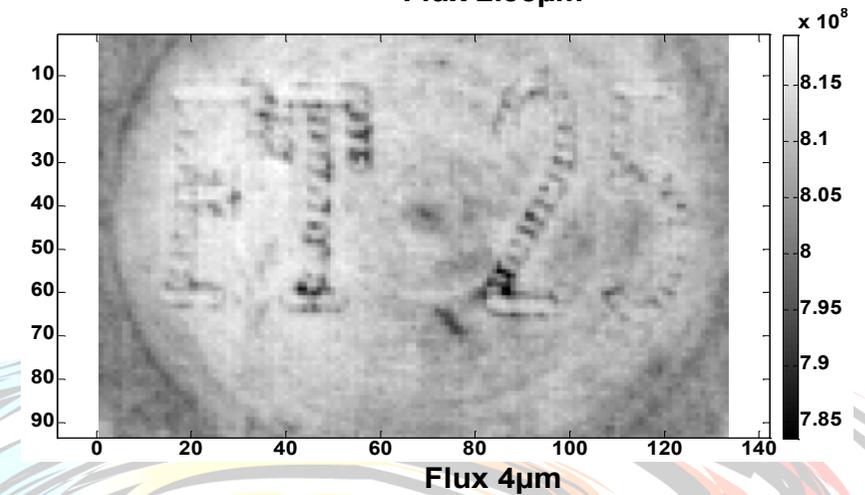
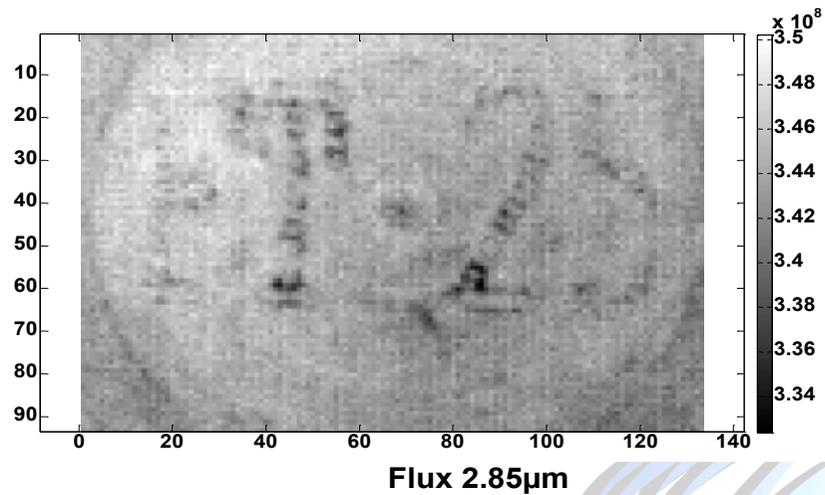
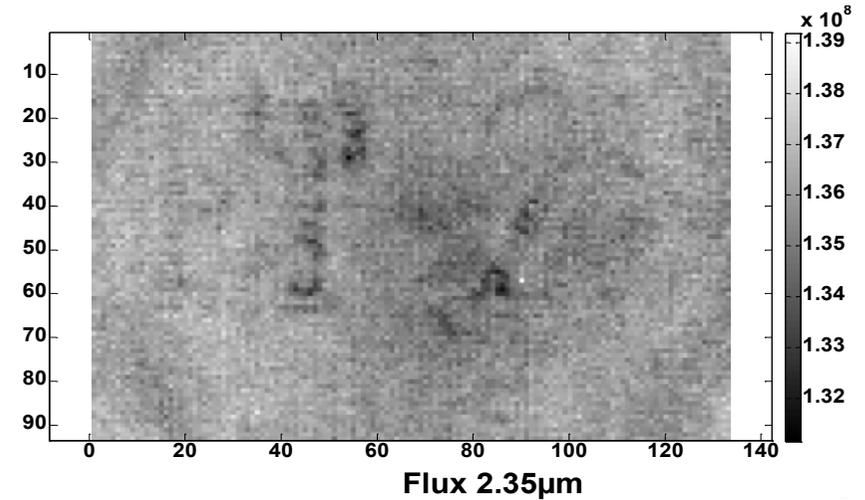
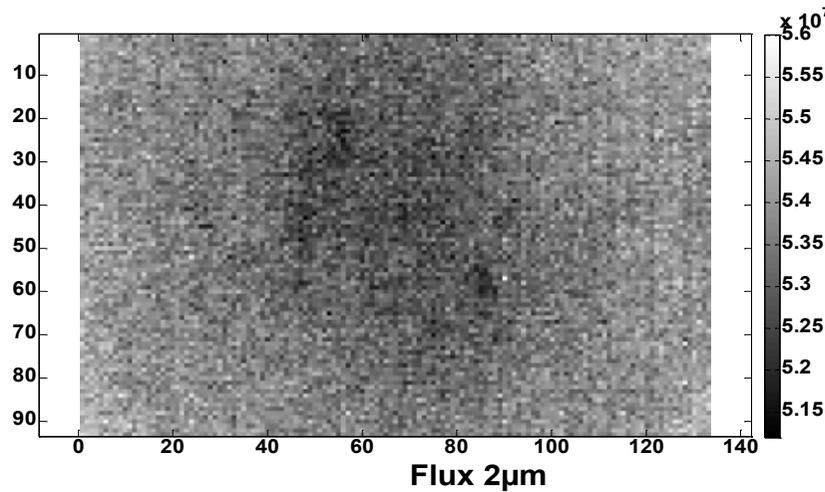


- L'échantillon est chauffé par un four tubulaire à 623K.
- On mesure ensuite le flux émis par l'échantillon aux 4 longueurs d'onde choisies :

$$\lambda_{exp} = \{2 ; 2.35 ; 2.85 ; 4\} \mu m$$



Images thermographiques d'une surface à 623K mesurée à 4 longueurs d'onde différentes



Temperature estimée

$$\varphi_T(\lambda) = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1}$$

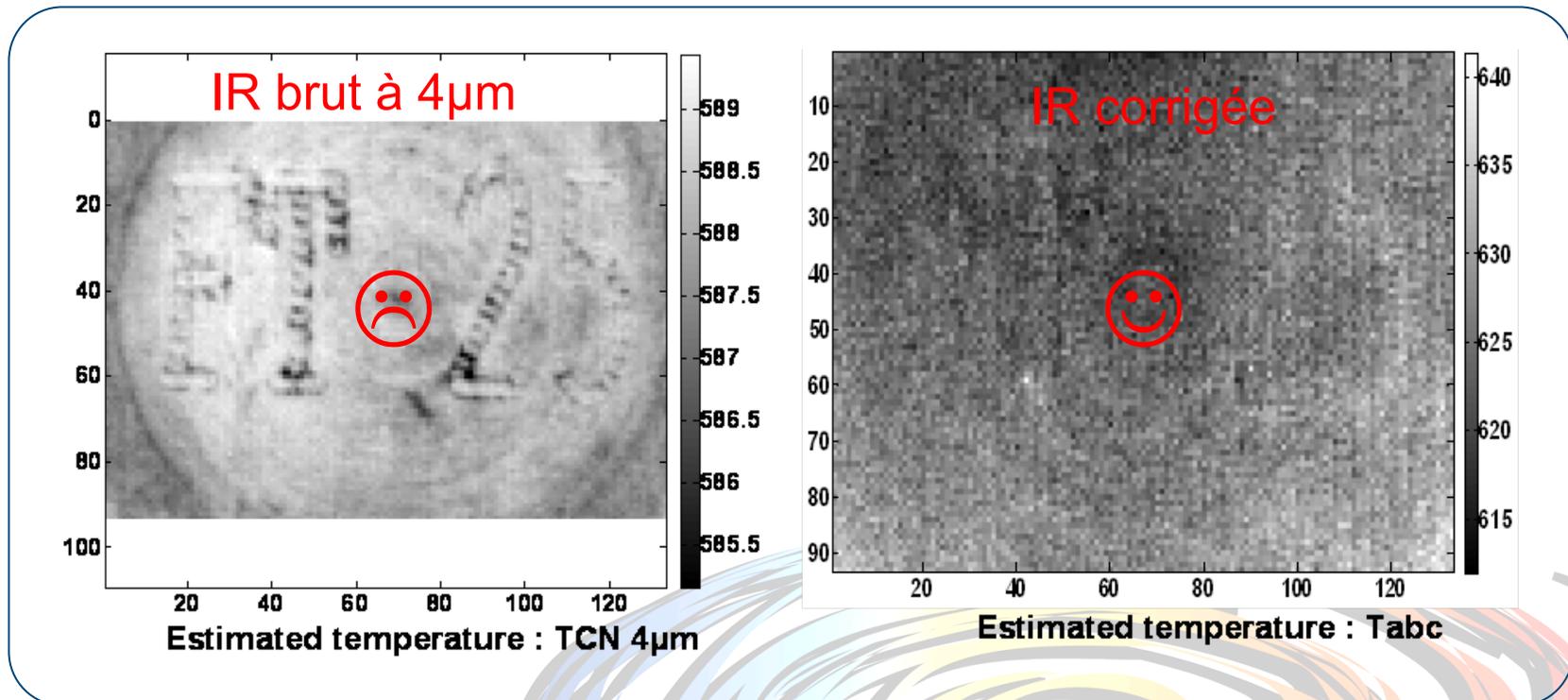
$\bar{T}_{CN} \approx 587K$

$$\varphi_{T,a,b,c}(\lambda) = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{f(\lambda) \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1}$$

$T_{exp} \approx 623K$

$\bar{T}_{Tabc} \approx 625K$

$\sigma_{Tabc} \approx 15K$



AUJOURD'HUI :

- Premier dispositif de la plateforme de Métrologie à Haute Température en LORRAINE

* **Caractérisation de solides anisotropes et liquides (Verre fondu) à 1600°C**

- Nombreux équipements scientifiques (Caméras UV – Visible et IR) :

- ✓ 2 caméras infrarouge InSb BB [$1,5\mu\text{m}$ - $5,5\mu\text{m}$] dont 1 multispectral (2 x 4 bandes à 100 Hz)
- ✓ 1 caméra EM-CCD (1024 x 1024 pixels) UV-Visible + Varispectre associé
- ✓ 1 caméra InGaS (Visible - NIR) + Varispectre associé



Corps Noir à large surface (20–600°C)



Corps Noir à cavité (300–1700°C)

Couverture continue des gammes spectrales de l'UV à l'infrarouge moyen

✓ 1 Laser Nd-Glass à 1,04 μ m de 50 J polarisé (100-300 μ s) fibré avec torche de focalisation

* **Caractérisation de très bons conducteurs et barrières céramiques de faible épaisseur**



Développement de techniques multi-spectrales optimisées sur ces différentes gammes de longueur d'onde.

Demain :

- « Projet Métallurgie Lorrain », en collaboration avec l'IJL, (le LEMTA est pilote de la Plateforme de Métrologie HT Fluide et Thermique)

- ✓ Calorimètre à chute,
- ✓ Diffusivimètre 1D à 2400°C assisté par induction,
- ✓ puis réfractaire fondu à 3000°C ...

Merci pour votre attention !



- [1] B. Remy, A. Degiovanni et D. Maillet, Mesure de la diffusivité thermique de matériaux anisotropes de petites dimensions par thermographie infrarouge et transformations intégrales, Congrès Français de Thermique, SFT 2007, Île des Embiez, 29 mai-1 juin 2007
- [2] Y. Souhar, J. Dillet, B. Remy, Y. Jannot & A. Degiovanni, "Caractérisation de matériaux anisotropes à haute température par méthode impulsionnelle et thermographie infrarouge", Congrès Français de Thermique, SFT 2008, Toulouse, 3-6 Juin 2008.
- [3] Y. Souhar, B. Remy, Y. Jannot and A. Degiovanni, "Measurement of Thermal Diffusivities of Anisotropic Materials at High Temperature Using Integral Transforms and Infrared Thermography", 18th European Conference on Thermophysical Properties, Pau, France 31 Aug-4 Sep 2008.
- [4] Y. Souhar, B. Remy, Y. Jannot and A. Degiovanni, "Mesure de la diffusivité thermique de matériaux anisotropes à haute température", Séminaire MFHT-3 Château Laval, Gréoux les Bains, 22-24 Octobre 2008.
- [5] Y. Souhar, B. Remy and A. Degiovanni, "Measurement of Thermal Diffusivities of Anisotropic Materials at High Temperature Using Integral Transforms and Infrared Thermography", Int. J. of Thermophysics, 2010.
- [6] B. Remy, Y. Souhar et A. Degiovanni, "Micoscopie thermique par photomultiplicateur et caméra de l'UV au proche IR", Journée GDR Pyrométrie à Haute Température, CEA Cesta – 12 Mars 2009.
- [7] B. Remy, Y. Souhar et A. Degiovanni, "Thermal Characterization of Anisotropic Materials Through Integral Methods", ICTCIP'09, Sousse (Tunisia), 25-27 April 2009.
- [8] Y. Souhar, B. Remy, B et & Degiovanni, A.. *High Temperature Facility Under Vacuum for the Thermal Characterization of Anisotropic Materials*. 14th International Heat Transfer Conference. Washington DC, USA. IHTC 14, Washington (USA), 08-13 August 2010.
- [9] B. Remy, Y. Souhar et A. Degiovanni, "Thermographie et Métrologie thermique", *Thermogram'2009 (Conférence invitée)*, 10-11 décembre 2009, Reims, ISBN 2-9513961-4-7, pp. 41-71.
- [10] T. Pierre, B. Remy and A. Degiovanni, "A functional approach of the experimental device transfer function for temperature measurements in the UV-visible wavelengths with multi-spectral method", IHTC 14, Washington (USA), 08-13 August 2010.
- [11] B. Cretin and B. Remy, "Thermal Microscopy with Photomultipliers and UV to IR Cameras" (Book's Chapter 14 in *Thermal Nanosystems and Nanomaterials*), pp. 411-439. ISBN 978-3-642-04257-7. DOI 10.1007/978-3-642-04258-4, Springer 2009.
- [12] B. Remy, J.P. Lassere, A. Degiovanni, "Estimation of the spatial distribution of high flux pulse stimulations through Infrared Thermography", Int. J on IR Thermography - QIRT Journal, Vol.7, n°2, 2010, pp 237-254.

- [13] B. Remy and S. André, "Thermal Measurements and Inverse Technique", Helcio R.B. Orlande, Olivier Fudym, Denis Maillet and Renato M. Cotta (Chap. 9, "Non-Linear Estimation Problem"), 2011, CRC Press (In Press).
- [14] B. Remy and A. Degiovanni, "Thermal Characterization of Anisotropic Materials at High Temperature Through A Laser Flash Method and Fast Infrared Camera", Materials & Fluids at High Temperature, MFHT-4, Orléans, 30-31 Mars & 01 Avril 2011 (Conférence invitée).
- [15] B. Remy and S. André, Thermal Measurements and Inverse Technique: CRC Press 2011. Helcio R.B. Orlande ; Olivier Fudym ; Denis Maillet ; Renato M. Cotta, 2011.
- [16] B. Remy, S. André, and D. Maillet, "Non Linear Parameter Estimation Problems : Tools for Enhancing Metrological Objectives", Metti 5 "Thermal Measurements & Inverse Techniques, Advanced Spring School, Roscoff, France, p. 59, 2011.
- [17] B. Remy and A. Degiovanni, "Thermal Characterization of Anisotropic Materials at High Temperature Through A Laser Flash Method and Fast Infrared Camera", 4ème Matériaux & Fluids at High Temperature, MFHT-4, Orléans, France, 2011.
- [18] B. Remy and A. Degiovanni, "Thermal Characterization of Anisotropic Materials at High Temperature Through A Laser Method and Fast Infrared Camera", Materials & Fluids at High Temperature, MFHT-4, Orléans, France, 2011 (Conférence invitée).
- [19] C. Rodiet, T. Pierre, B. Remy, and A. Degiovanni, "Mesure de température par méthode multi-spectrale dans l'Infrarouge et l'Ultraviolet", Congrès de la Société Française de Thermique, SFT 2011, Energie Solaire et Thermique, Perpignan, France, 2011.
- [20] B. Remy and A. Degiovanni, "Simulation du remplissage de moules : Un nouveau Challenge pour l'Industrie Verrière", Séminaire à Saint-Gobain Recherche, Aubervilliers, France, 2011.
- [21] B. Remy, M. Souhar, and A. Degiovanni, "Les équipements de Thermographie InfraRouge d'aujourd'hui sont-ils adaptés pour répondre aux nouveaux défis de la Métrologie thermique ?", Journée SFT Les caméras de thermographie des années 2000 : Performances pour les applications de recherche, Paris, France, 2011.
- [22] B. Remy, Modèle radiatif simplifié pour la simulation de transferts thermiques couplés dans les systèmes complexes : "Application au remplissage de moules", Congrès Français de Mécanique, Besançon, 28 Août-02 Septembre 2011 (Conférence invitée)
- [23] B. Remy, Y. Souhar et A. Degiovanni, "Evolution des caméras thermiques et Métrologie thermique", Thermogram'2011, Châlons-en -Champagne, 08-09 Décembre 2011, pp. 157-202. (Conférence invitée).
- [24] M. Gradeck, J.A. Ouattara, B. Remy, D. Maillet , "Solution of an inverse problem the Hankel space – Infrared thermography applied to estimation of a transient cooling flux", Experimental Thermal and Fluid Science 36 (2012) 56–64.