

# Identification de conditions limites en flux par thermographie infrarouge appliquée à la caractérisation de moyens d'essai thermique à haut flux

J.C. BATSALE\*, JP LASSERRE\*\* , A. DESCUNS\*,\*\* , G. LAMOTHE\*,\*\*

\*TREFLE-ENSAM, UMR 8508, Esplanade des Arts et Métiers, F- 33405 Talence, France.

\*\* CEA, CESTA, F- 33114 LE BARP Cedex, France.  
jeanpierre.lasserre@cea.fr

# Plan

---



- Présentation des moyens à haute densité de flux
- Identification de conditions limites en flux par thermographie infrarouge
  - Mesure en plan
  - Mesure sur un cylindre en rotation
- Conclusion et perspectives

# Plan

---



- **Présentation des moyens à haute densité de flux**
- Identification de conditions limites en flux par thermographie infrarouge
  - Mesure en plan
  - Mesure sur un cylindre en rotation
- Conclusion et perspectives

# Moyens infrarouge

- Moyens infrarouges « bas flux » :

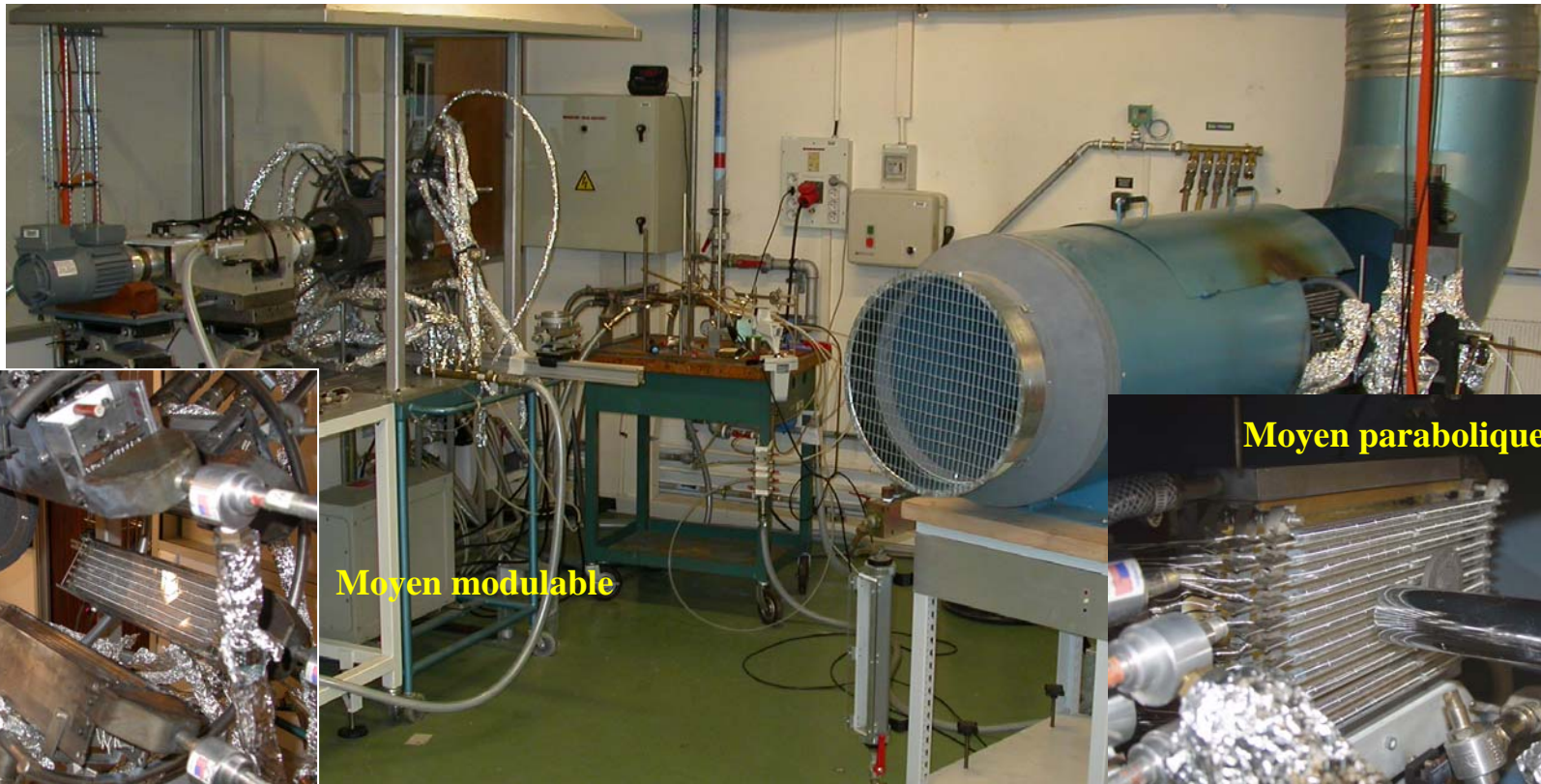
- Lampes à filaments de Tungstène de 7 kW: 200 kW/m<sup>2</sup> sur un plan de 10x10 cm<sup>2</sup>
- Forte flexibilité: pilotage en température ou en flux thermique
- Applications : qualification thermique de composants, essais d'incendie, étalonnage de capteurs de flux, caractérisation thermiques (bois, isolants, ...)



# Moyens infrarouge

- Moyens infrarouges « haut flux » :

- Lampes à filaments de Tungstène de 7 kW
- Jusqu'à  $3 \text{ MW/m}^2$  sur qq dizaines de  $\text{cm}^2$  en fonction du temps: moyens plan ou modulable ( $1 \text{ MW/m}^2$ , 10s) pour objets axisymétriques
- Applications : comportement thermique et thermomécanique de matériaux et de structures sous sollicitations sévères (rentrée atmosphérique de véhicules hypersoniques, .... )



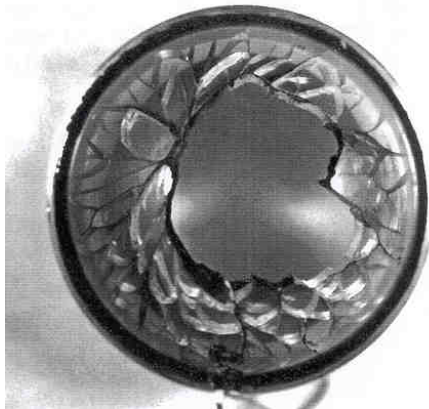
Moyen modulable

Moyen parabolique

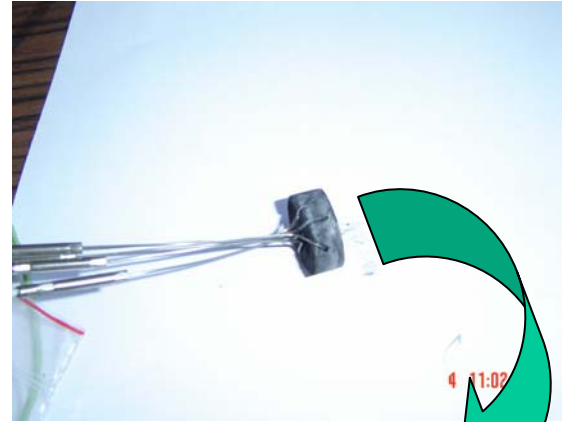
# Applications

- Moyens infrarouge « haut flux » :

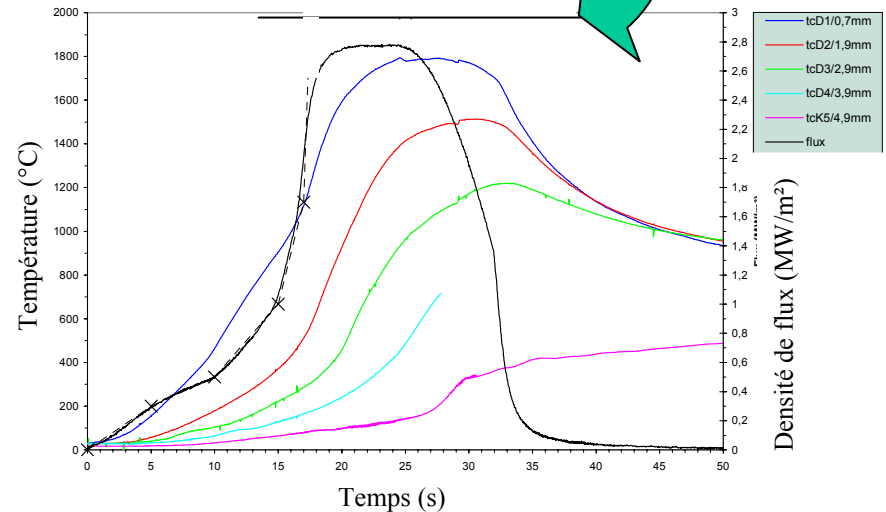
Sollicitations thermiques de plusieurs  $\text{MW/m}^2$  ou moins sur des échantillons ou des éléments de structure conséquents (homogénéité sur  $\Phi$  60 mm)



*Qualification d'une instrumentation d'écran thermique avant essai en vol*

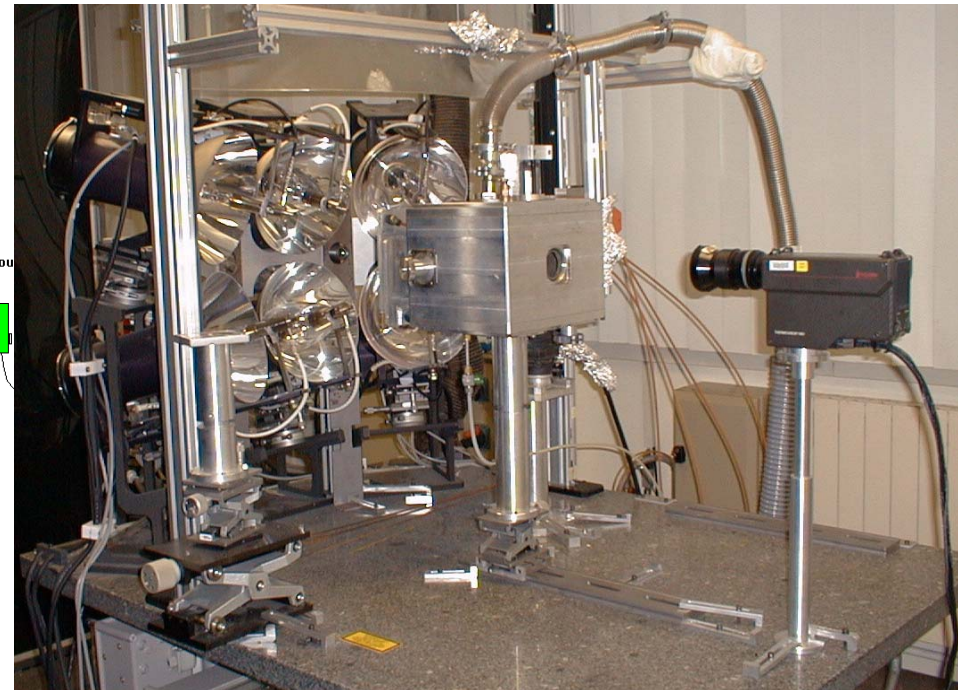
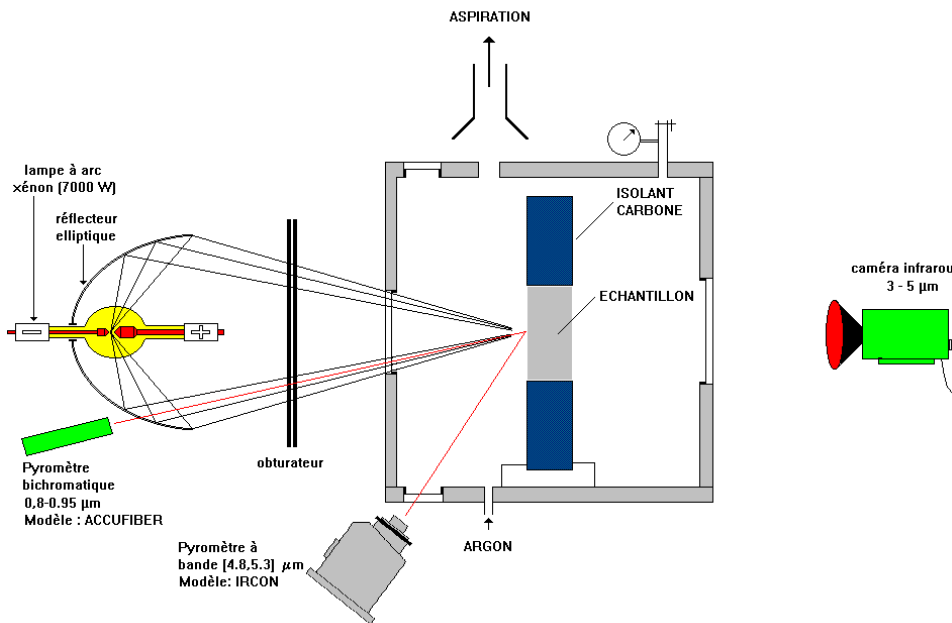


*Comportement thermomécanique d'un hémisphère céramique soumise à un flux thermique de  $2 \text{ MW/m}^2$*



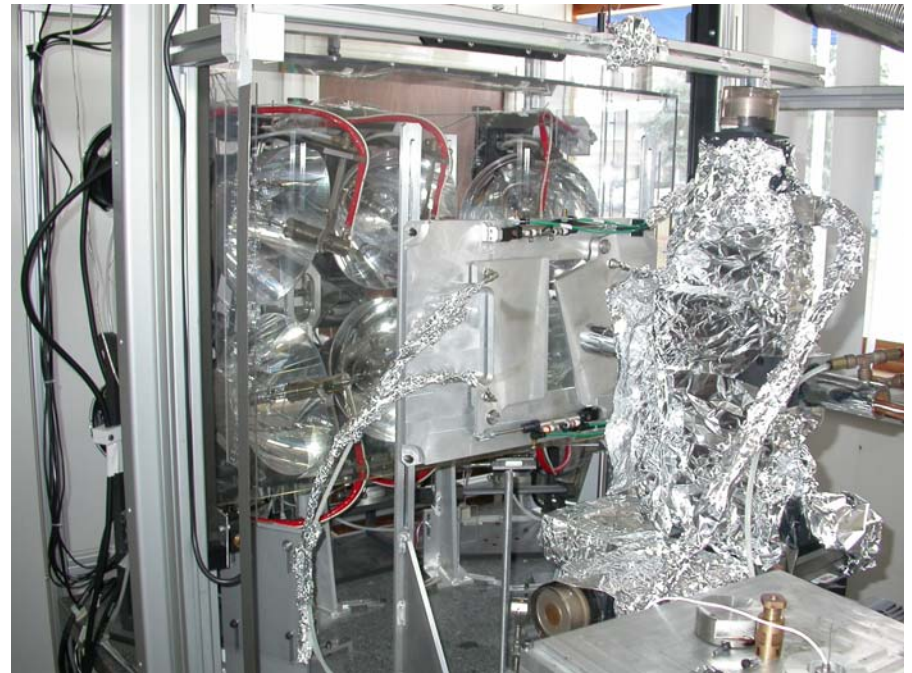
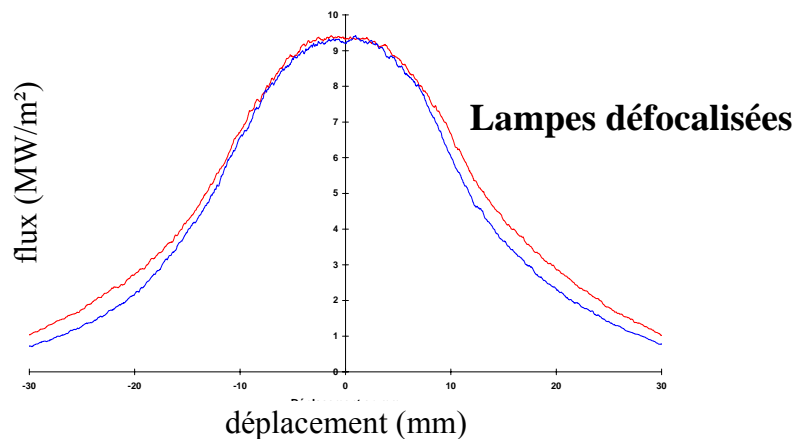
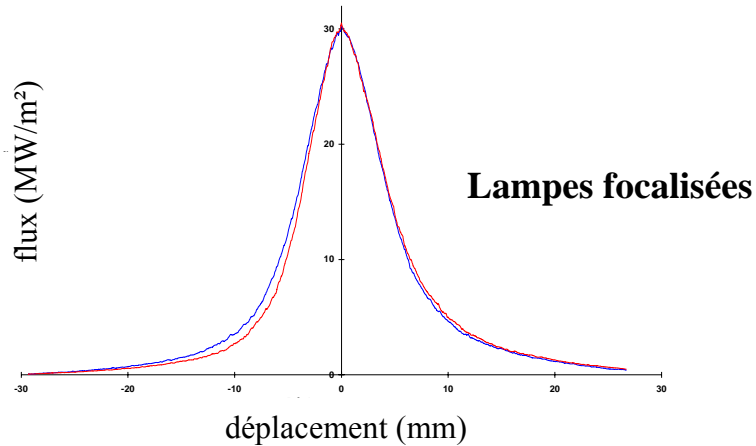
# Fours à image d'arc

- Four à image d'arc (6 lampes) :
  - Lampes à arc de Xénon de 7 kW imagées au deuxième foyer d'un réflecteur elliptique
  - Ensemble des deuxièmes foyers en coïncidence
  - Sollicitation en flux thermique de type échelon ou dépendante du temps
  - Essais sous air ou atmosphère contrôlée



# Fours à image d'arc

- Répartition spatiale de flux du four à image d'arc 6 lampes :
  - Lampes focalisées: densité de flux de 30 MW/m<sup>2</sup> au deuxième foyer dont la distribution est gaussienne
  - Lampes défocalisées: 9 MW/m<sup>2</sup> à 10% près sur un zone circulaire  $\Phi$  13 mm

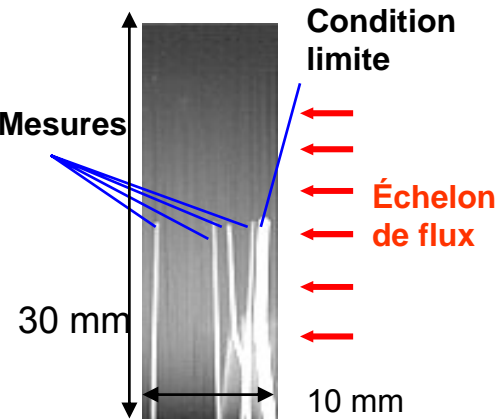




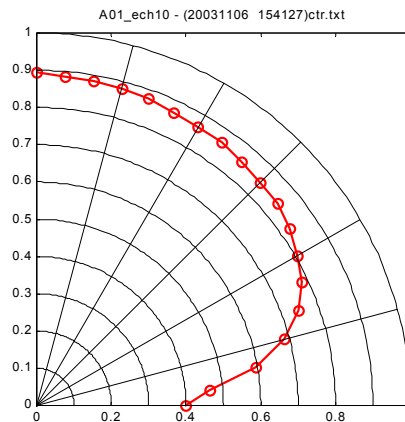
# Applications

- Fours à image d'arc

- Sollicitations thermiques de l'ordre de  $9 \text{ MW/m}^2$  ou moins sur des échantillons
- Possibilité de diagnostic en faces avant et arrière (caméra visible ou infrarouge)
- Essais sous air ou en atmosphère contrôlée
- **Caractérisation de matériaux à haute température: conductivité thermique, émissivité directionnelle, ....**



Éprouvette de composite C/C instrumentée pour la mesure de conductivité thermique



Emissivité spectrale directionnelle d'un échantillon de C/SiC  
Bande  $[3.5 - 5] \mu\text{m}$ , température de 1300 K



**Béton réfractaire soumis à une température pariétale de 2300 K** (conditions de type fusion de cœur – densité de flux de  $2.5 \text{ MW/m}^2$ ) – demande EDF

# Besoin de connaissance des conditions limites en flux

---



- La maîtrise et l'interprétation des essais réalisés sur les moyens à haute densité de flux nécessitent de connaître le niveau et la distribution spatiale du flux appliqué
- Opération réalisée habituellement par balayage mécanique d'un fluxmètre GARDON
  - Relativement lourd à mettre en œuvre
  - Mesure 1D
- Intérêt pour des mesures par thermographie infrarouge couplées aux méthodes inverses
  - Mise en œuvre plus facile
  - Mesure 2D
- Configuration de mesure adaptée aux moyens d'essai
  - mesure sur plaque mince pour les moyens « plans »
  - mesure sur cylindre en rotation pour les moyens de révolution

# Plan

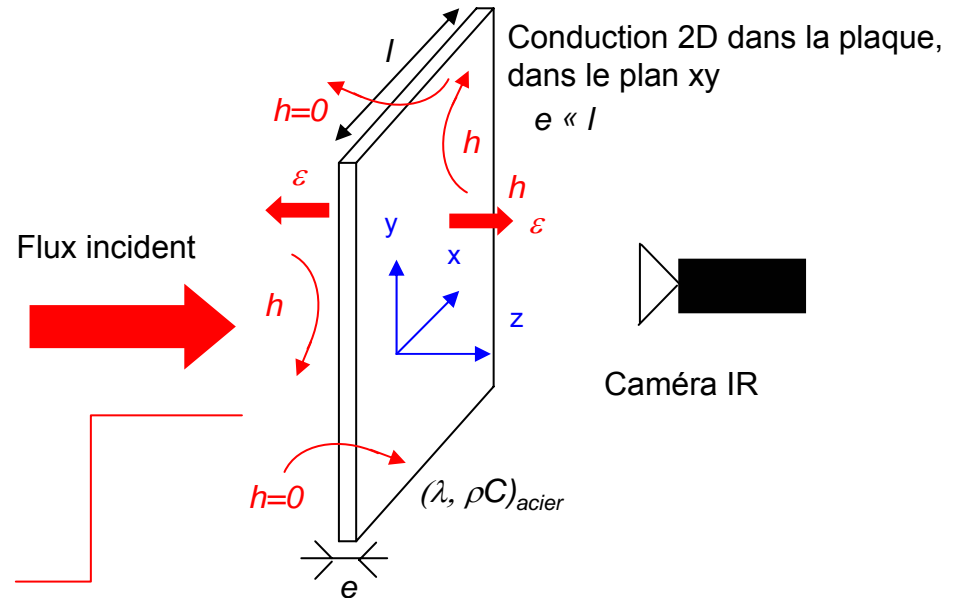
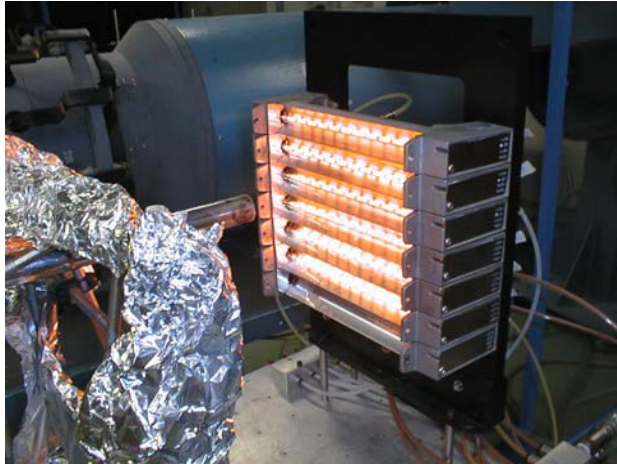
---



- Présentation des moyens à haute densité de flux
- Identification de conditions limites en flux par thermographie infrarouge
  - Mesure en plan
  - Mesure sur un cylindre en rotation
- Conclusion et perspectives

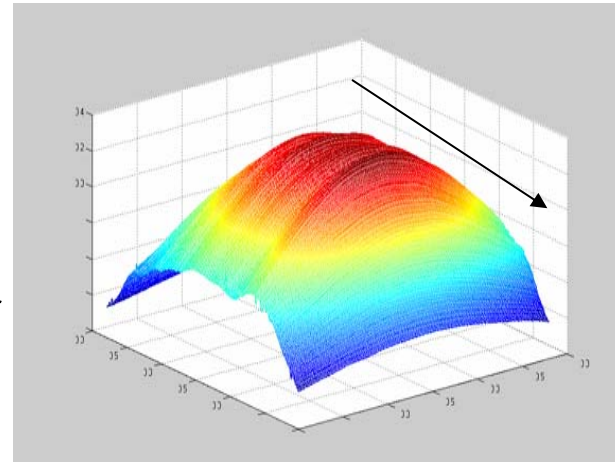
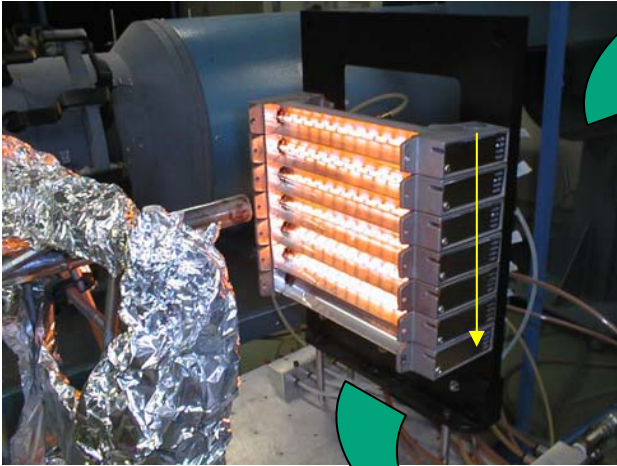
# Identification du flux généré par un moyen thermique plan

Méthode proposée (*collaboration avec le laboratoire TREFLE*)

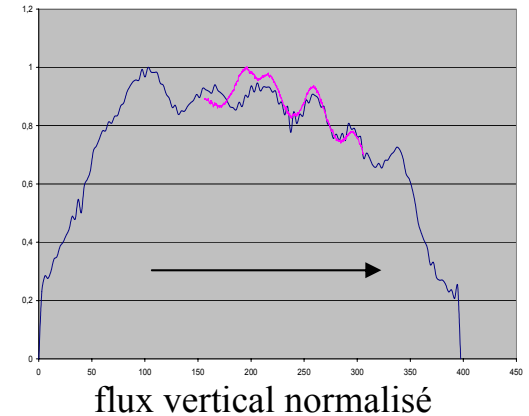
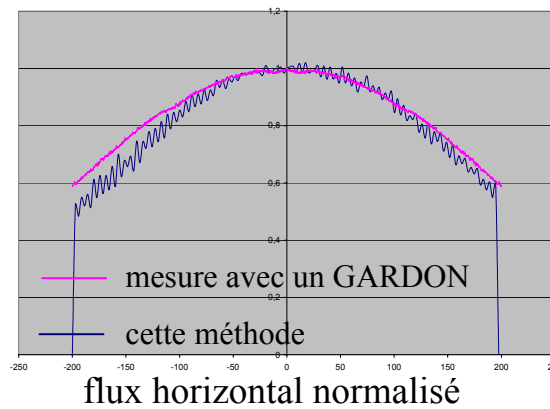


- Sollicitation de type échelon
- Hypothèse d'un transfert 2D dans le plan de la plaque
- Schéma numérique: schéma explicite aux différences finies
  - ➔ Répartition spatiale de flux quelconque
- Estimation de la densité de flux locale par la méthode des moindres carrés linéaires

# Résultats



Répartition spatiale de flux 2D obtenue par cette méthode



- **Bon accord entre les distributions spatiale de flux obtenues par cette méthode et par balayage d'un fluxmètre GARDON**
- **Nécessite un étalonnage absolu**

# Plan

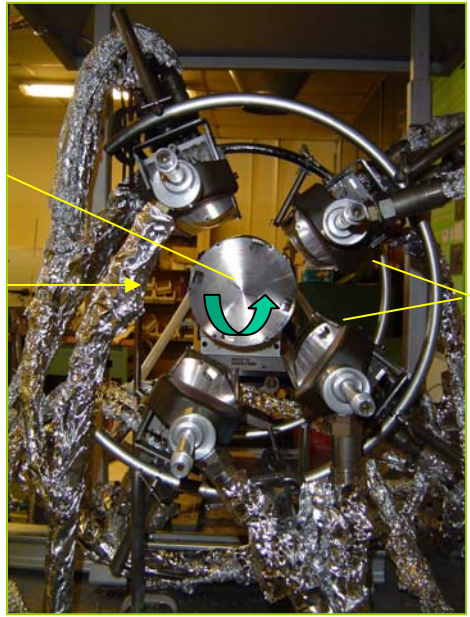
---



- Présentation des moyens à haute densité de flux
- **Identification de conditions limites en flux par thermographie infrarouge**
  - Mesure en plan
  - **Mesure sur un cylindre en rotation**
- Conclusion et perspectives

# Identification du flux appliqué à un cylindre en rotation

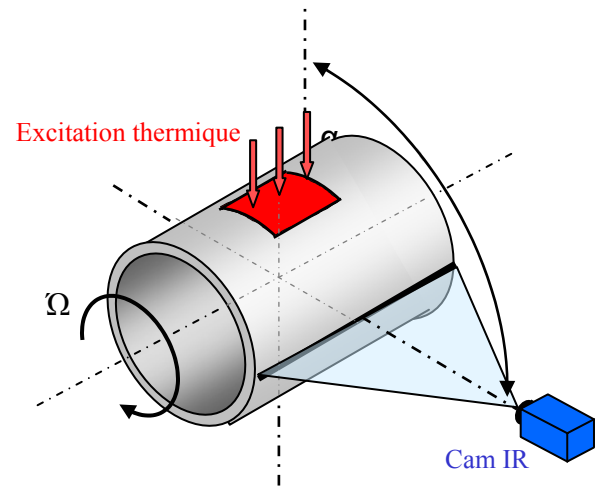
- Contexte: l'analyse de la distribution spatiale de flux intense sur des surfaces courbes est un aspect important de la caractérisation de la rentrée atmosphérique de véhicules hypersoniques



mandrin de serrage de l'objet étudié  
espace de mesure par caméra

lampes infrarouge

**Moyen haut flux axisymétrique ELISA**  
densité de flux de quelques MW/m<sup>2</sup>  
élévation de température jusqu'à 2000°C

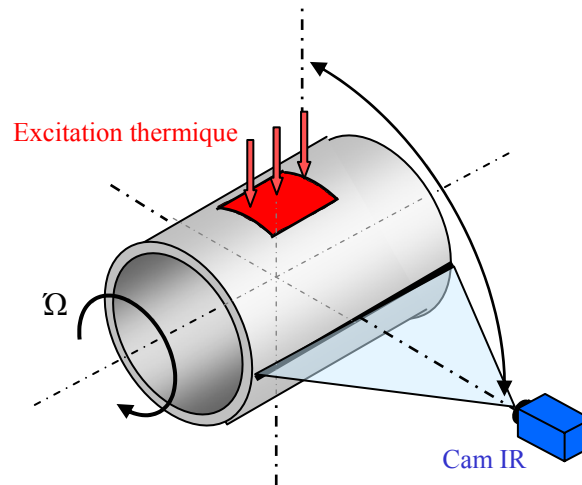


Excitation thermique  
 $\Omega$   
Cam IR  
densité de flux de 20 MW/m<sup>2</sup>  
élévation de température modérée

- Étude avec une sollicitation de type flash et analyse de la réponse en température de la surface extérieure du cylindre mesurée par thermographie infrarouge (*collaboration avec le laboratoire TREFLE*)

# Intérêt de la méthode

- Caméra infrarouge non exposée au flux
- Minimisation des réflexions parasites
- L'utilisation d'une caméra matricielle donne accès à un grand nombre d'informations
- L'utilisation d'une source flash avec une fenêtrage rectangulaire du signal
  - permet de traiter la diffusion de la chaleur comme un problème séparable
  - permet d'atteindre une haute densité de flux (temps d'application faible)



- Méthode utilisée:
  - Estimation de la diffusivité thermique du cylindre
  - Estimation de la distribution initiale de température, fonction de la distribution initiale de flux de chaleur



# Modélisation du problème

**Hypothèses :** • Épaisseur  $\ll l$  et  $L$   $\longrightarrow$  La diffusion dans l'épaisseur est négligée.

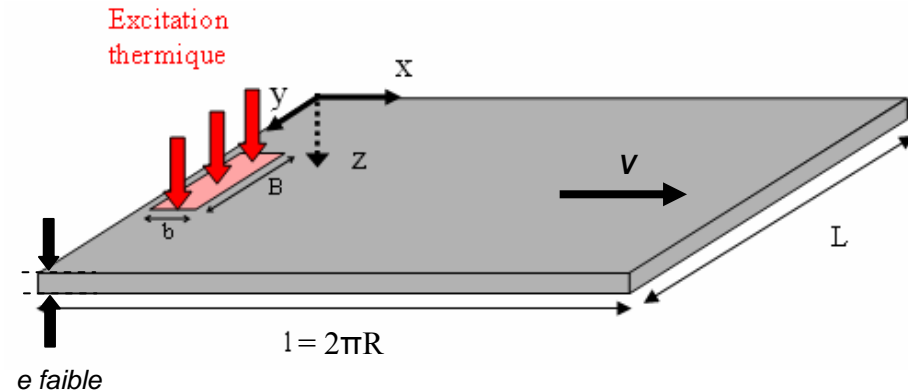
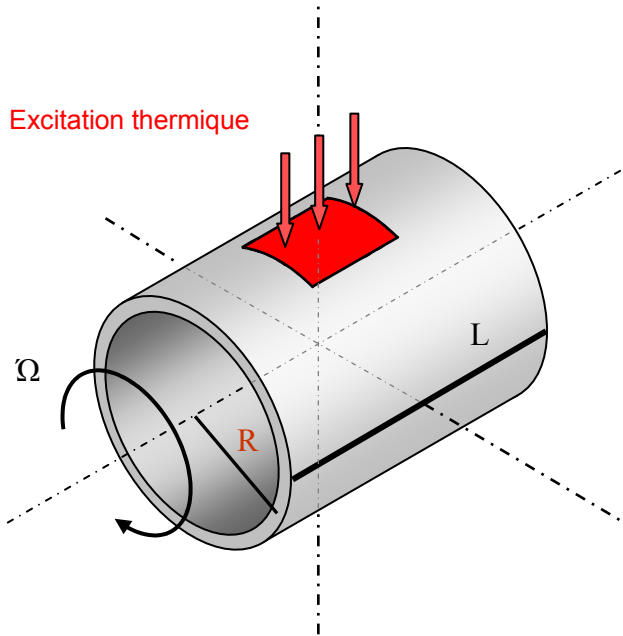


• Le problème est considéré à variables séparables  $\longrightarrow$

$$\Phi(x, y, t) = \Phi(x, t) \times \Phi(y, t)$$

Circonférence Génératrice

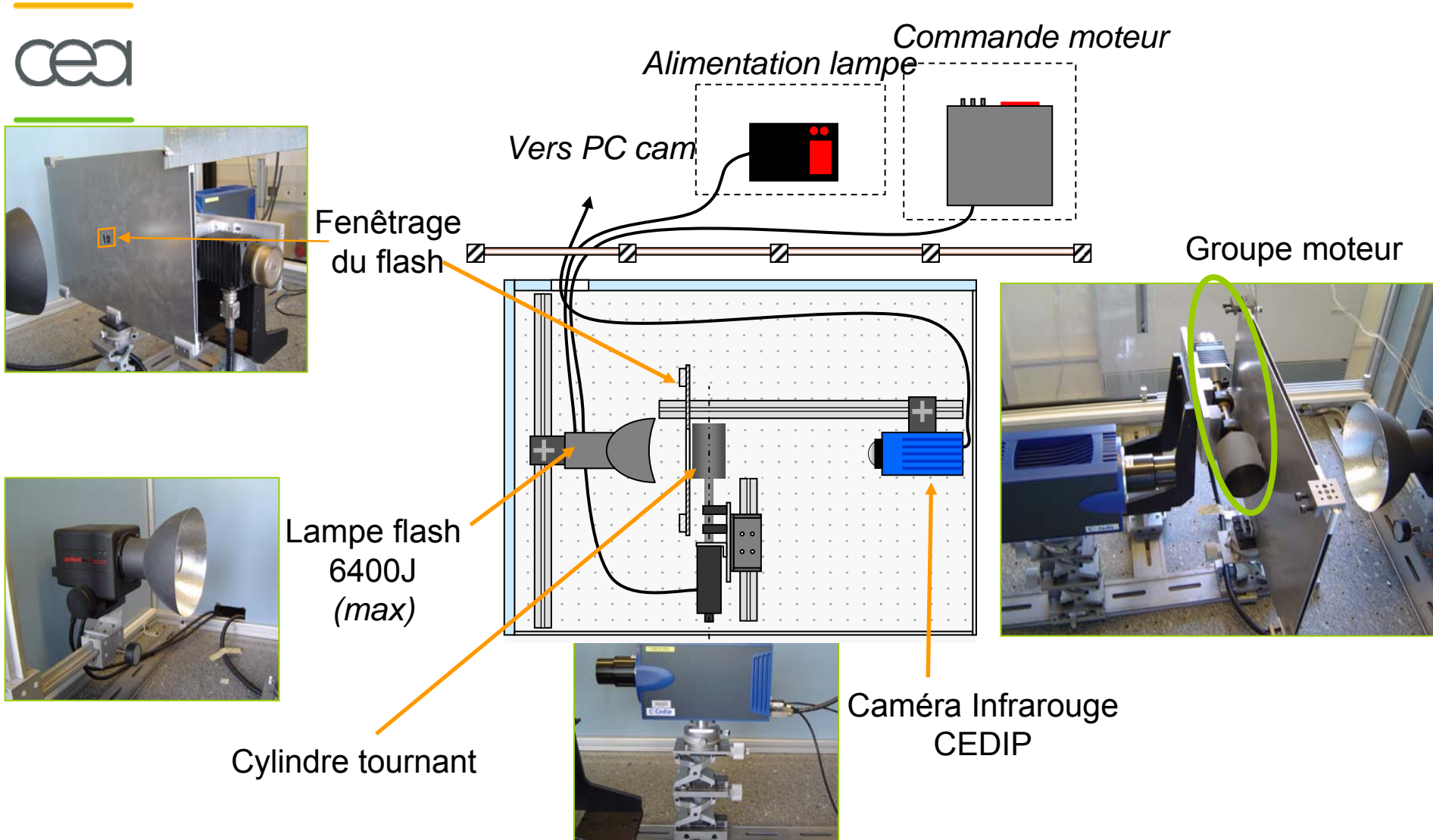
**Modèle retenu :** plaque rectangulaire mince et condition de périodicité en température



Équation de la chaleur simplifiée :

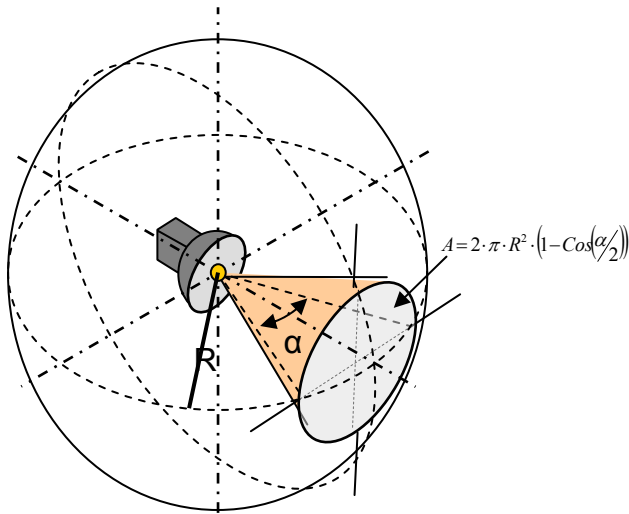
$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - \frac{V}{a} \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t}$$

# Dispositif expérimental



# Dispositif expérimental

- Fréquence d'acquisition : 150Hz
  - Fréquence de rotation du cylindre : 1 - 2 Hz
  - Durée du flash : environ 1/250 s
  - Intensité du flash : 4000J
  - Matériau : acier inox ( $a = 4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ )
- } ~ 10 points on 2 cm (cylindre  $\Phi 40 \text{ mm}$ ,  $e 1.2 \text{ mm}$ )
- } Densité de flux: ~ 20MW/m<sup>2</sup>  
(fenêtre de 30\*20 mm<sup>2</sup>)

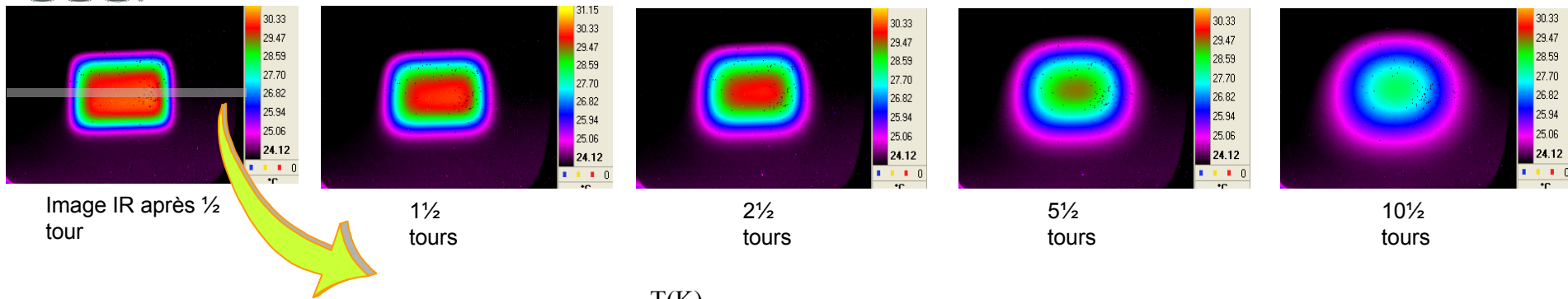


Calcul approché de la densité de flux



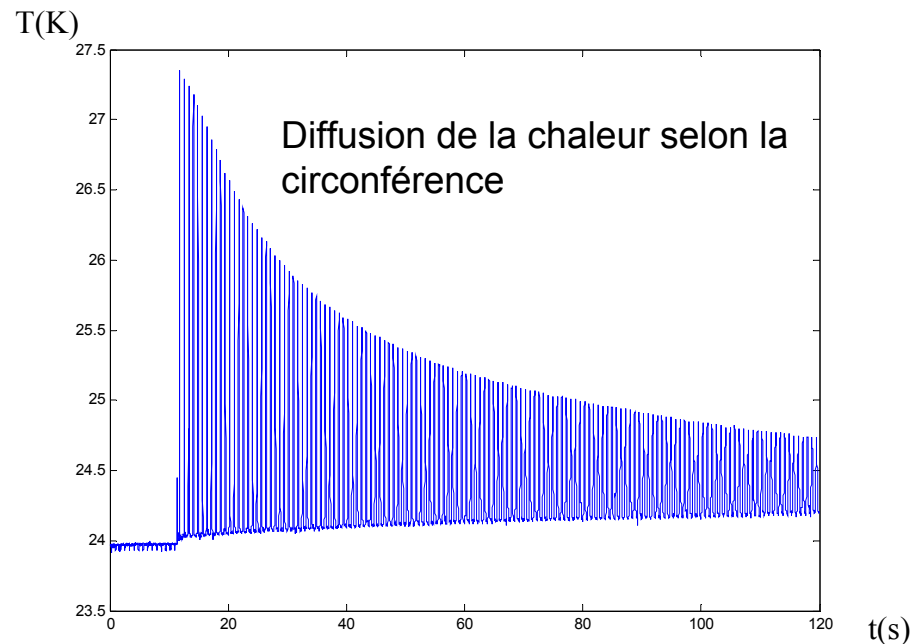
➔ **Élévation de température maximum  
d'environ 10 à 20 K**

# Allure des acquisitions

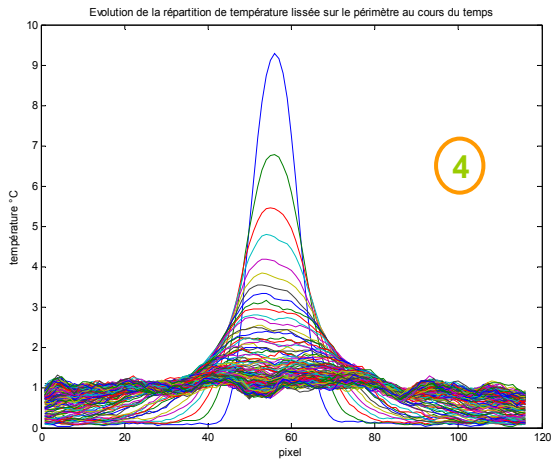
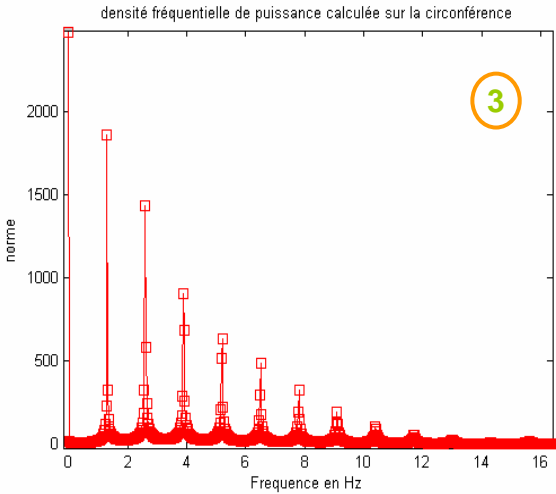


Moyenne de la température sur une ligne de pixel suivant la génératrice

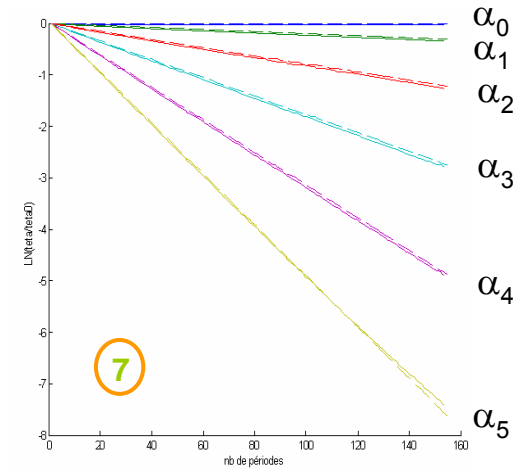
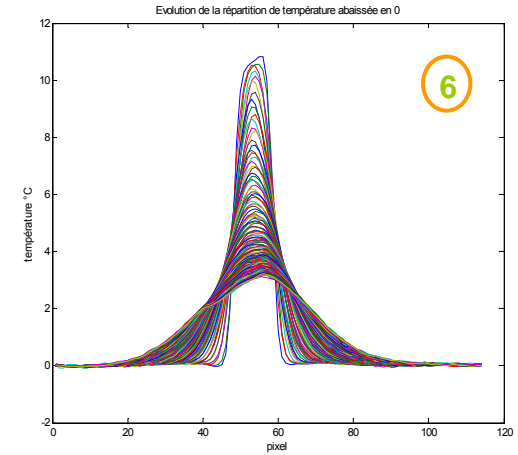
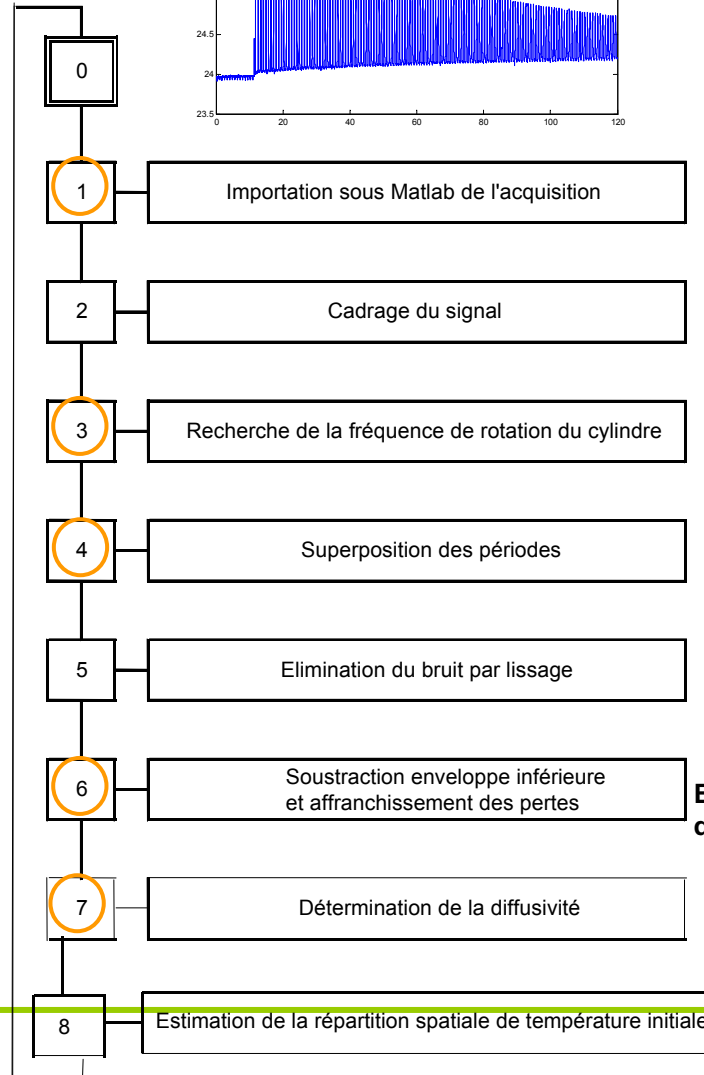
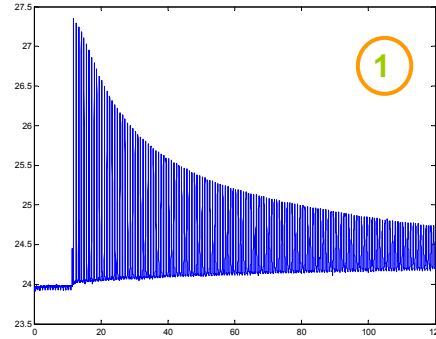
Permet de s'affranchir de la diffusion de la chaleur dans cette direction



# Traitement numérique – diffusion sur la circonférence



Champ de température dans l'espace du cylindre aux différentes périodes



$$\ln \left( \frac{\theta(\alpha_n, t)}{\theta(\alpha_n, 0)} \right) = -a\alpha_n^2 t \quad \text{avec} \quad \alpha_n = \frac{2n\pi}{2\pi R}$$

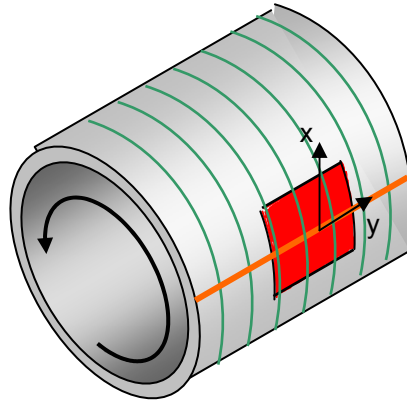
# Estimation de la diffusivité

- Suivant la circonférence – direction x

- Moyenne des températures sur une génératrice à chaque instant

$$T(x,t) = \frac{\sum_{i=1}^{N_{pixel}} T(y_i,t)}{N_{pixel}}$$

- Moyenne des températures par tour de chaque pixel de la circonférence

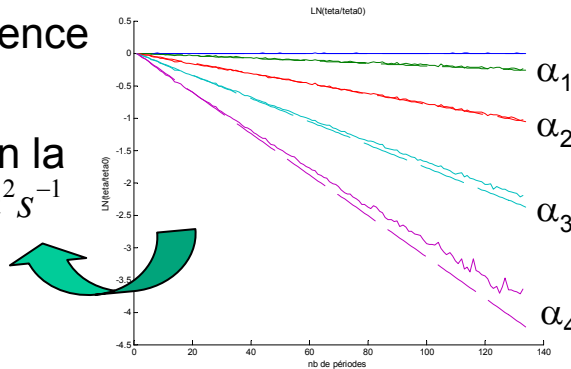


- Suivant le génératrice – direction y

- Moyenne des températures par tour de chaque pixel d'une génératrice

$$T_{tour}(y,t) = \frac{1}{\frac{L}{V}} \int_{\frac{nL}{V}}^{\frac{(n+1)L}{V}} T(x = x_o, y, t) dt$$

- Estimation de la diffusivité selon la circonférence  $a = (4.0 \pm 0.4) 10^{-6} m^2 s^{-1}$



- Estimation de la diffusivité selon la génératrice  $a = (4.2 \pm 0.2) 10^{-6} m^2 s^{-1}$

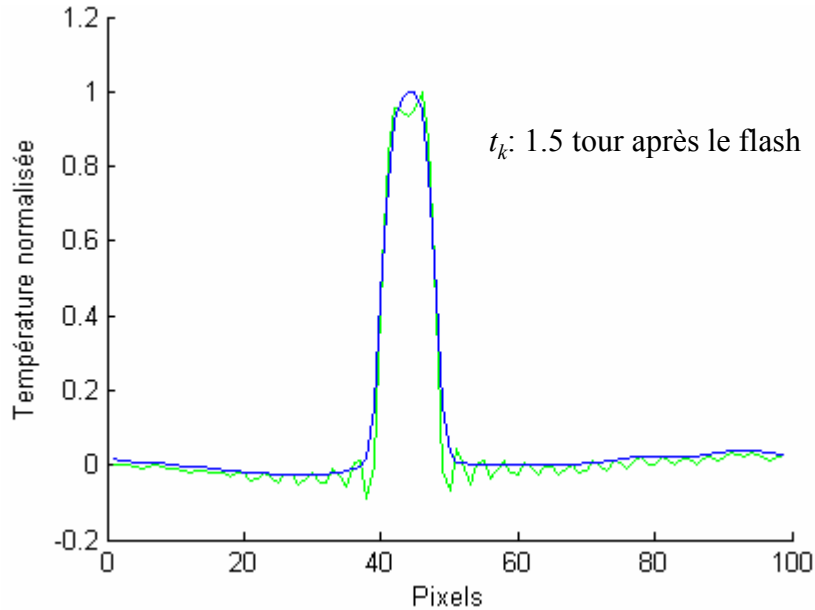
On valide ainsi la méthode et on vérifie l'isotropie du cylindre en acier  
En utilisant la diffusivité identifiée, on peut alors estimer le champ initial de température

# Estimation du champ de température initial

- Estimation du champ de température initial
  - A partir de temps proches de la sollicitation

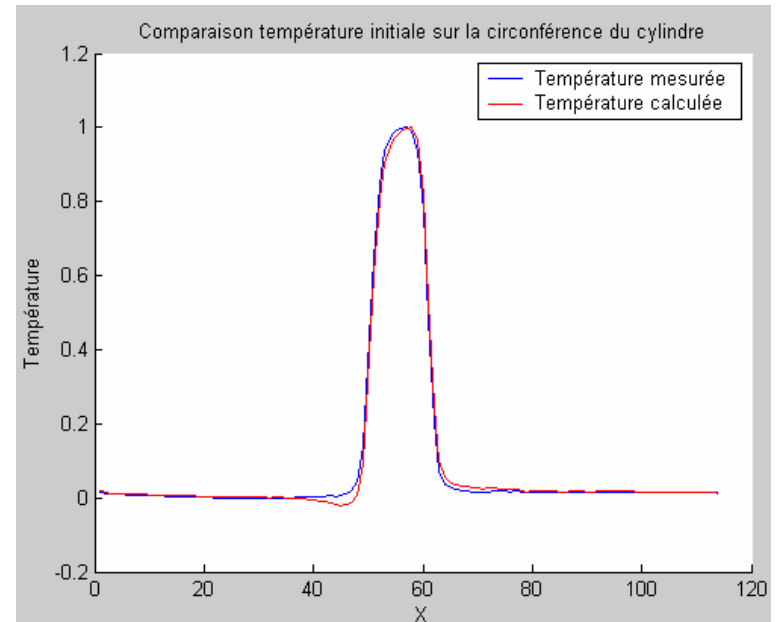
## Formulation simple de la température initiale

$$\theta(\alpha_n, t_0) = \theta(\alpha_n, t_k) \times \exp[+a\alpha_n^2(t_k - t_0)]$$



## Formulation optimisée au sens des moindres carrés

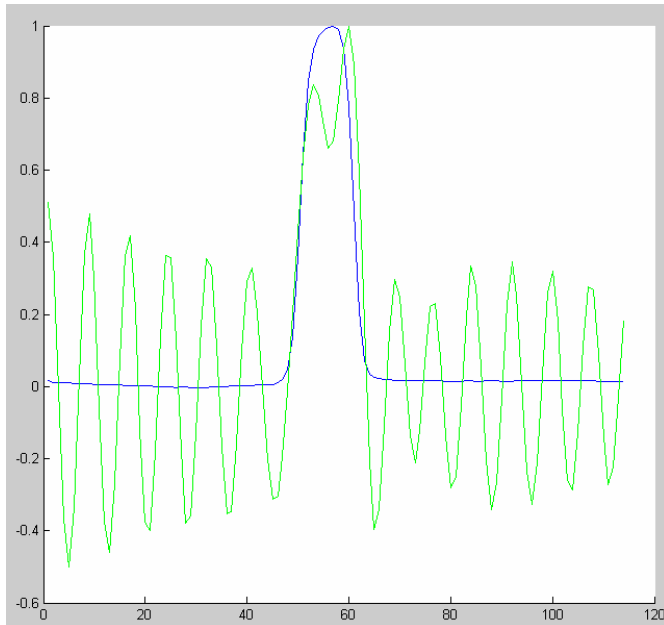
$$\theta(\alpha_n, t_0) = \frac{\sum_{k=1}^{N_t} \exp(-a\alpha_n^2(t_k - t_0)) \cdot \hat{\theta}(\alpha_n, t_k)}{\sum_{k=1}^{N_t} \exp(-2a\alpha_n^2(t_k - t_0))}$$



# Estimation du champ de température initial

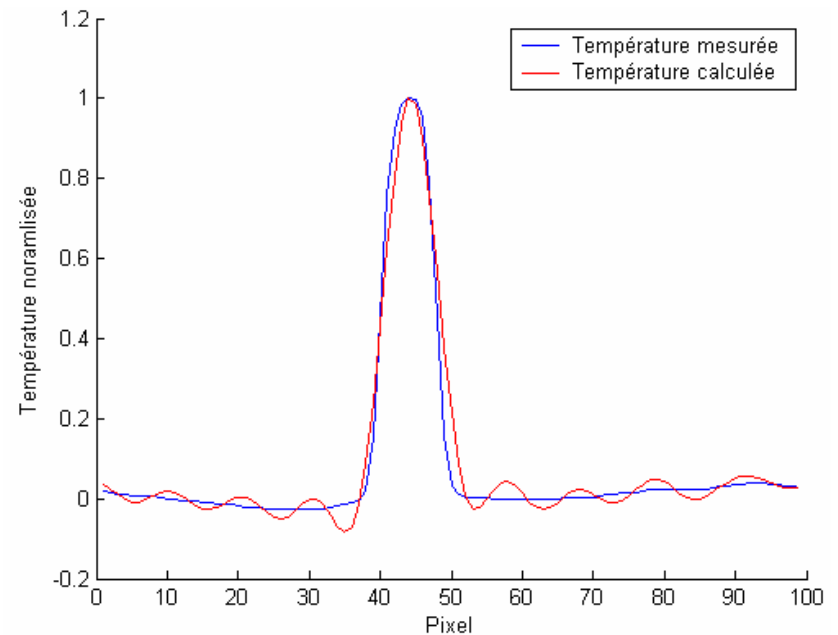
- Estimation du champ de température initial
  - A partir de temps éloignés (15<sup>ème</sup> tour après la sollicitation) pour tester la robustesse (cas de matériaux plus diffusifs, cylindre de plus grand diamètre)

## Formulation simple de la température initiale



## Formulation optimisée au sens des moindres carrés

$$\theta(\alpha_n, 0) = \frac{\sum_{j=1}^{N_t} \hat{\theta}(\alpha_n, t_{k+j}) \exp(-a \alpha_n^2 t_{k+j})}{\sum_{j=1}^{N_t} \exp(-2(a \alpha_n^2) t_{k+j})}$$



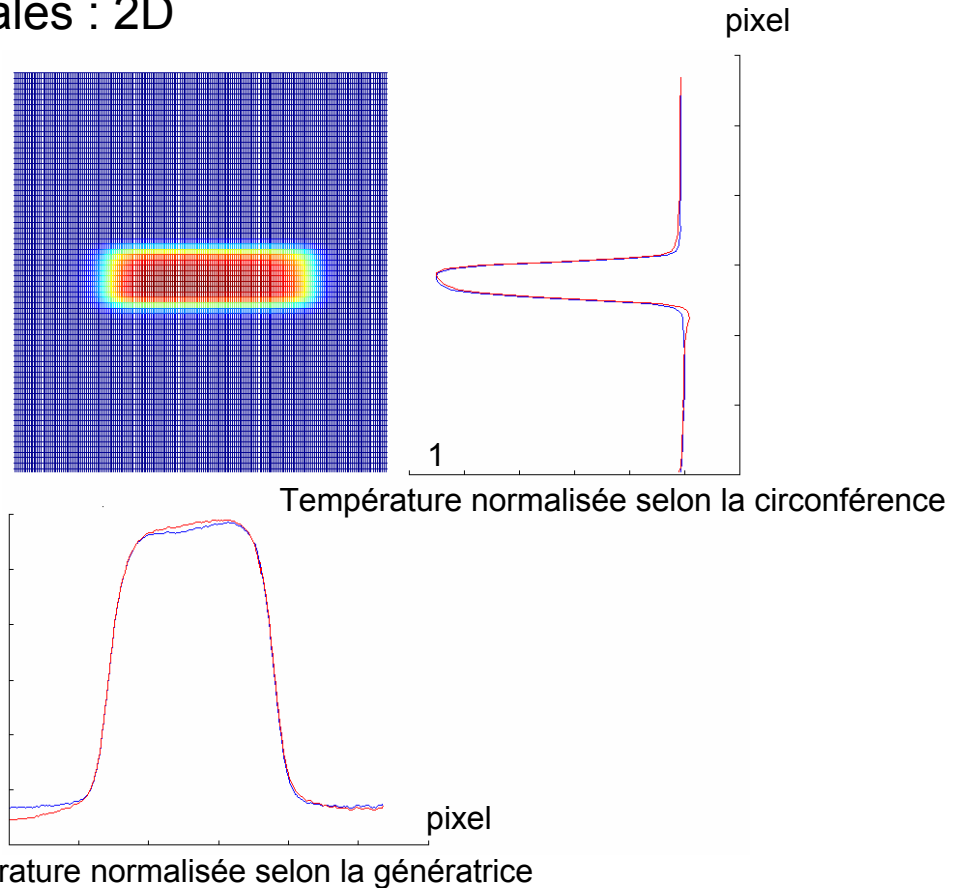


# Estimation du champ de température initial

- Retour aux conditions initiales : 2D



$$T(x, y, t = 0) = T(x, t = 0) \times T(y, t = 0)$$



- **Bonne corrélation entre la répartition de température initiale et la distribution du flux de chaleur produit par le flash**
- **Estimation du champ de flux initial, connaissant la chaleur massique du matériau et la durée du flash**

$$Q = \rho e C_P \frac{dT}{dt}$$

# Conclusion

---



- Les moyens d'essai thermiques à haut flux du CESTA permettent d'étudier le comportement d'échantillons ou d'éléments de structure de quelques centaines de  $\text{KW/m}^2$  à plusieurs  $\text{MW/m}^2$
- La distribution spatiale du flux appliqué est mesurée par balayage de fluxmètres GARDON  
Mesure satisfaisante mais 1D, longue et difficile à mettre en œuvre
- Mesures par thermographie infrarouge couplées aux méthodes inverses
  - Adaptées à la forme de la source, de mise en œuvre facile, 2D mais à ce jour uniquement qualitatives
  - Appliquées à la mesure de champ de flux sur plaques minces pour une sollicitation échelon
  - Appliquées au cylindre en rotation pour une sollicitation de type flash
    - Permet d'accéder à de hautes densité de flux avec de faibles niveaux de température
    - Méthode robuste



- Mesures de champ de flux sur plaques minces
  - Mise en œuvre pour les fours à image d'arc (matériau réfractaire)
- Mesures de flux sur cylindres en rotation
  - Se rapprocher des conditions d'essais des moyens haut flux
    - distribution spatiale de flux non séparable
    - sollicitation temporelle de type échelon
    - évolution temporelle de flux quelconque
  - Amélioration de la configuration flash: étude de la précision de la mesure, mesure quantitative