



Thermographie infrarouge et conduction inverse :
estimation d'une source surfacique
de chauffage par induction.

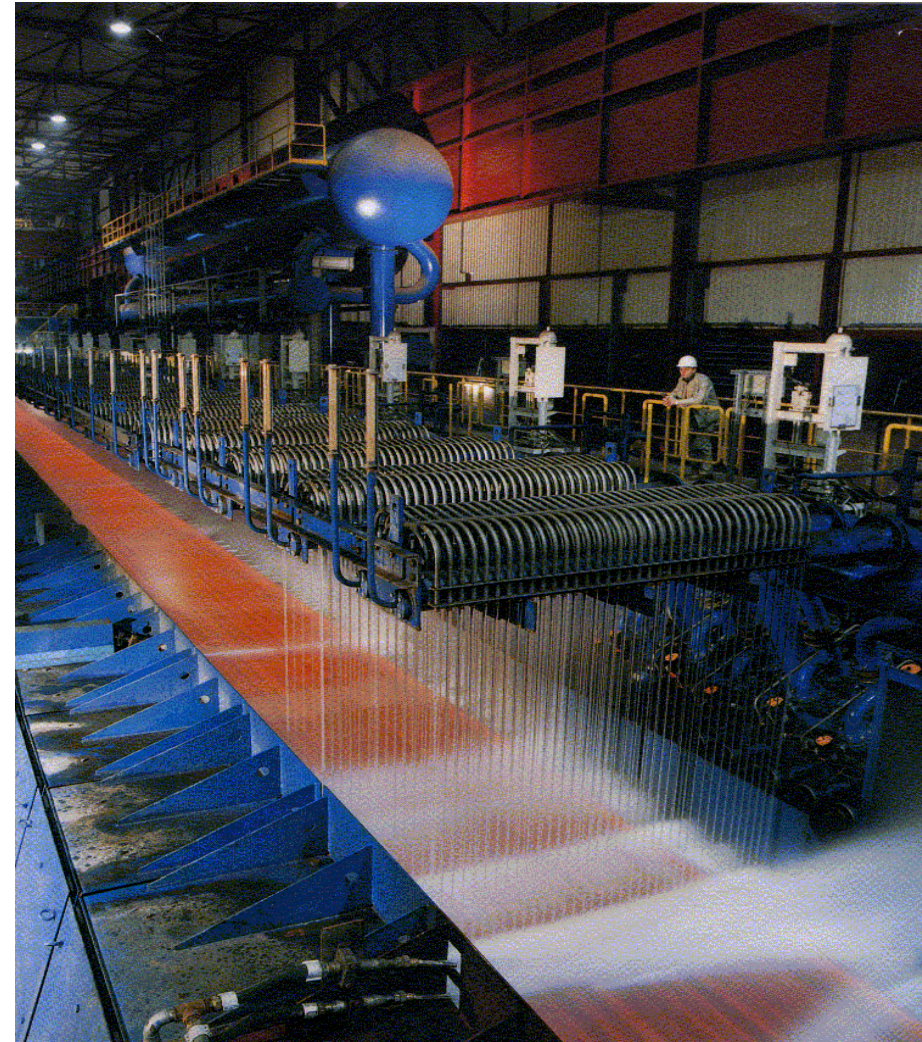
Aboubacar OUATTARA, Denis MAILLET, Michel GRADECK, Michel LÉBOUCHE

Objectif : - influence composition fluide (fluide indus # eau du réseau)

→ refroidissement lors de la trempe de bande d'acier en sortie de laminoire

Etude : configuration statique

Défilement des bandes d'aciers en sortie de laminoir
et refroidissement par jet



Comment? - chauffage par induction

- mesure T face AR (TIR) \longrightarrow T , flux face AV (conduction inverse)

Nouveauté: - ébullition convective par chauffage par induction

- mesure de température par TIR - 600°C

Avantage: - pas de déplacement de pièce chaude

- non intrusive

Inconvénients: - ϵ ?

- étalonnage de la caméra IR par corps noir

2 Phases

(1) Mesure du champ de *Température en face arrière*  estimation chauffage

(2) Mesure du champ de *Température en face arrière* et chauffage connu



estimation du flux de refroidissement

Configuration expérimentale

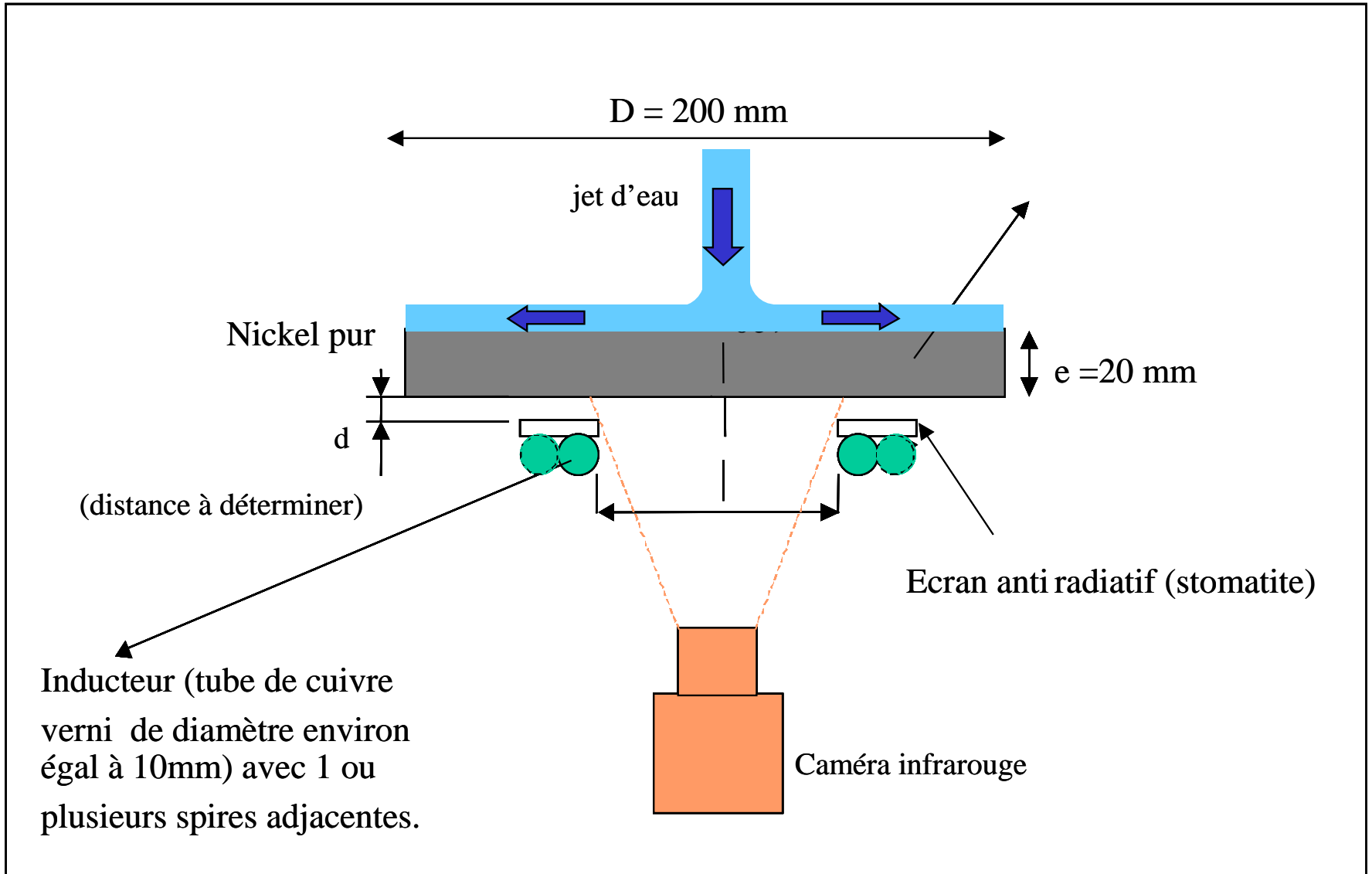


Figure1: Schéma du dispositif expérimentale

Phase1: Estimation du chauffage

Caméra:

1. Estimation émissivité

Loi d'étalonnage

$$DL^{\circ}(T, T_{\text{boitier}}) = DL^*(T) + eT_{\text{boitier}} + f$$

$$DL^*(T) = Ae^{-B/T}$$

$$DL^*(T) = aT^3 + bT^2 + cT$$

$$DL_{\text{final}} = \varepsilon DL^*(T_{\text{final}}) + (1 - \varepsilon) DL^*(T_{\text{envi}}) + eT_{\text{boitier}} + f$$

$$DL_{\text{initial}} = \varepsilon DL^*(T_{\text{initial}}) + (1 - \varepsilon) DL^*(T_{\text{envi}}) + eT_{\text{boitier}} + f$$

$$\text{si } T_{\text{envi}} = T_{\text{initial}} \Rightarrow DL^*(T_{\text{envi}}) = DL^*(T_{\text{initial}})$$

$$\varepsilon = \frac{DL_{\text{final}} - DL_{\text{initial}}}{DL^{\circ}(T_{\text{final}}, T_{\text{boitier}}) - DL_{\text{initial}}} \Rightarrow \varepsilon = 0.94$$

2. Mesure de température

$$DL^*(T) = \frac{DL - eT_{\text{boitier}} - f - (1 - \varepsilon) DL^*(T_{\text{envi}})}{\varepsilon}$$

$$DL^*(T) = Ae^{-B/T} \rightarrow T = f(DL^*)$$

Estimation du chauffage

Inducteur 20kHz

Chauffage Nickel de diamètre 175 mm et d'épaisseur 5mm

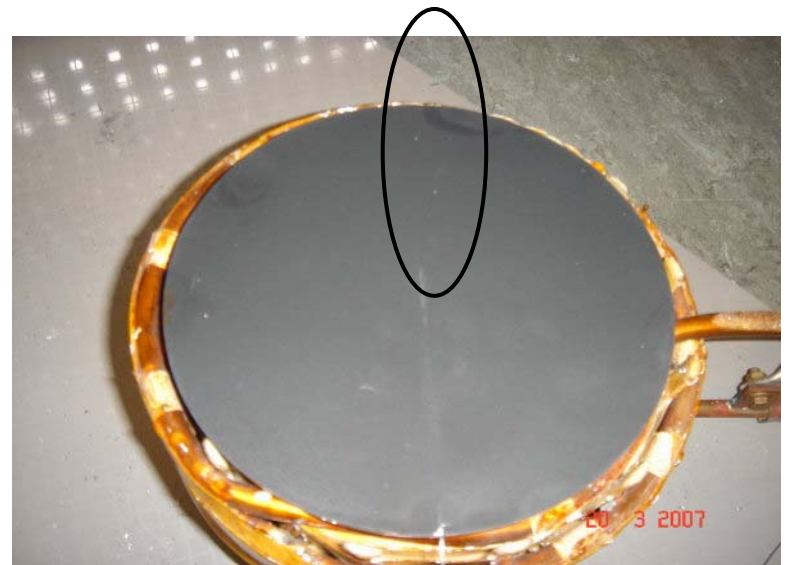
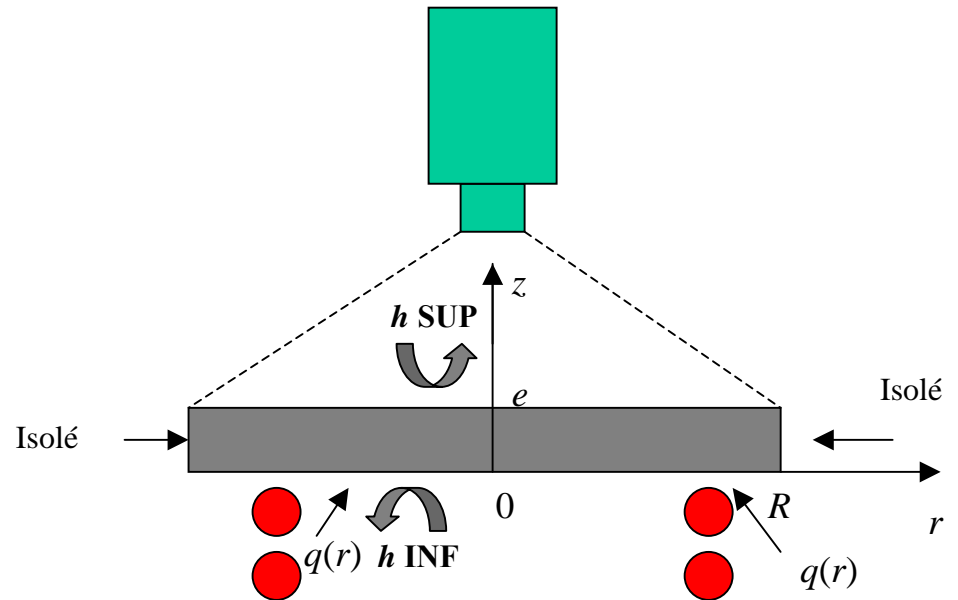
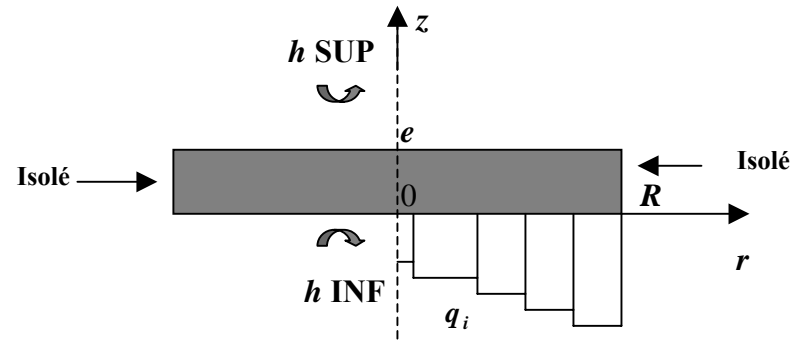


Figure3: Photographie de la rondelle

Problème direct



NB : effet de peau \Rightarrow chauffage surfacique en $z = 0$

Axisymétrie du problème \Rightarrow simulation 1D entre 0 et R

$$q = \sum_{i=1}^{NFlux} q_i(r) \quad \text{avec les} \quad q_i(r) = q_i G_i(r)$$

des flux en créneaux définis sur l'intervalle r_i et r_{i+1}

$$\begin{aligned} G_i(r) &= 0 & \text{si} & \quad r \notin [r_i, r_{i+1}[\\ \text{ou} & \quad G_i(r) &= 1 & \text{si} & \quad r \in [r_i, r_{i+1}[\end{aligned}$$

- échauffement par rapport à l'ambiante:

$$T = T^{absolu}(r, z, t) - T^{absolu}(r, z, t=0)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = g(r, t) = q(r) H(t) - h_{SUP}^{EQ} \cdot T \quad \text{en } z = e$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad \text{en } r=0 \quad \text{et } r=R$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = h_{INF}^{EQ} \cdot T \quad \text{en } z = 0$$

$$T = 0 \quad \text{à } t=0$$

Hypothèses: puissance absorbée indépendante du niveau de température:

- travail à moins de 100°C pour son estimation

- modèle linéaire utilisé: linéarisation des pertes convectives et radiatives.

$$\bar{T}_{Film} = \frac{T_{\infty} + \bar{T}}{2} \quad \bar{T} = \frac{T_{\infty} + T_{max}}{2} \quad \text{avec } \alpha = SUP, INF \quad h_{\alpha}^{EQ} = h_{\alpha}(\bar{T}_{FILM}) + 4\sigma \varepsilon_{SUP} \bar{T}_{FILM}^3$$

et $h_{LAT}^{Eq} = 0$

T_{max} est la température maximale atteinte (connue à priori)

$$h_{SUP}^{EQ} = 10.4 \text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$$

$$h_{INF}^{EQ} = 5.1 \text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Double transformée Laplace (t) – Hankel (r) de l'équation de la chaleur:

$$\bar{T}(r, z, p) = \int_0^{\infty} T(r, z, t) e^{-pt} dt \quad \tilde{\tilde{T}}_n(z, p) = \int_0^R \bar{T}(r, z, p) r J_0(\alpha_n r) dr$$

avec $\alpha_n = \frac{u_n}{R}$ u_n solutions de $J_1(u) = 0$

- après transformation: $\frac{\partial \tilde{\tilde{T}}_n^2}{\partial z} - (\alpha_n^2 + \frac{p}{a}) \tilde{\tilde{T}}_n = 0$ avec $u_n \approx n\pi + \frac{\pi}{4} - \frac{3}{8(n\pi + \frac{\pi}{4})}$

$$\tilde{T}_n(z = e) = \bar{Z}_n(p) \tilde{q}_n / p$$

Avec:
$$\bar{Z}_n(p) = \frac{1}{((h_{SUP}^{EQ} + h_{INF}^{EQ}) \cosh(\gamma_n e) + \frac{h_{SUP}^{EQ} \cdot h_{INF}^{EQ}}{\lambda \gamma_n} \sinh(\gamma_n e) + \lambda \gamma_n \sinh(\gamma_n e))}$$

$$\tilde{T}_n(z = e) = \bar{W}_n(p) \tilde{q}_n \quad \bar{W}_n(p) = \bar{Z}_n(p) \frac{1}{p}$$

↑
impédance

$$\tilde{q}_n = \sum_{i=1}^{NFlux} \int_0^{r_i} q_i(r) r_i J_0(\alpha_n r_i) dr_i = \sum_{i=1}^{NFlux} \int_{r_i}^{r_{i+1}} q_i G_i(r) r J_0(\alpha_n r) dr$$

$$\tilde{q}_n = \sum_{i=1}^{NFlux} \frac{q_i}{\alpha_n} [r_{i+1} J_1(\alpha_n r_{i+1}) - r_i J_1(\alpha_n r_i)] = \sum_{i=1}^{NFlux} q_i \tilde{G}_{in}$$

En revenant dans l'espace temporel, par transformée inverse :

$$\tilde{T}_n(z = e, t) = \tilde{q}_n L^{-1}(\bar{W}_n(p))$$

Problème inverse

$T(r, t)$ expérimentale est mesurée en face avant par la caméra ($z = e$)

**Estimation des flux méthode moindres carrés ordinaires
avec densité de flux de chauffage en escaliers**

$$T(r, t) = \frac{2}{R^2} \sum_{n=0}^{\infty} \tilde{T}_n(t) \frac{J_0(\alpha_n r)}{J_0^2(\alpha_n R)} \quad \text{avec} \quad \tilde{T}_n(t) = W_n(t) \tilde{q}_n$$

$$T(r, t) = \frac{2}{R^2} \sum_{n=0}^{Nh} \frac{J_0(\alpha_n r)}{J_0^2(\alpha_n R)} W_n(t) \tilde{q}_n \quad \text{avec} \quad \tilde{q}_n = \sum_{i=1}^{NFlux} q_i \tilde{G}_{in}$$

$$\Rightarrow T(r, t) = \sum_{i=1}^{NFlux} \left[\frac{2}{R^2} \sum_{n=0}^{Nh} \left(\frac{J_0(\alpha_n r)}{J_0^2(\alpha_n R)} G_{in} \right) W_n(t) \right] q_i$$



Matrice des sensibilités

$$\Rightarrow \begin{pmatrix} T(r_0, t_k) \\ \cdot \\ \cdot \\ T(r_j, t_k) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ T(r_{Nr}, t_k) \end{pmatrix} = [X_{ji}(t_k)] \begin{pmatrix} q_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ q_i \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ q_{Nr} \end{pmatrix} \quad \text{ou} \quad \mathbf{T} = \begin{pmatrix} T(t_1) \\ T(t_2) \\ \cdot \\ \cdot \\ T(t_{Nt}) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X(t_1) \\ X(t_2) \\ \cdot \\ \cdot \\ X(t_{Nt}) \end{bmatrix} \mathbf{q} \quad (3.d)$$

$$\Rightarrow \mathbf{T}(t_k) = \mathbf{X}(t_k) \mathbf{q} \quad \mathbf{q} = [q_1 \quad q_2 \quad \cdots \quad q_{Nt}]^T \quad (3.e)$$

$$\Rightarrow \mathbf{T} = \mathbf{X} \mathbf{q} \quad (3.f)$$

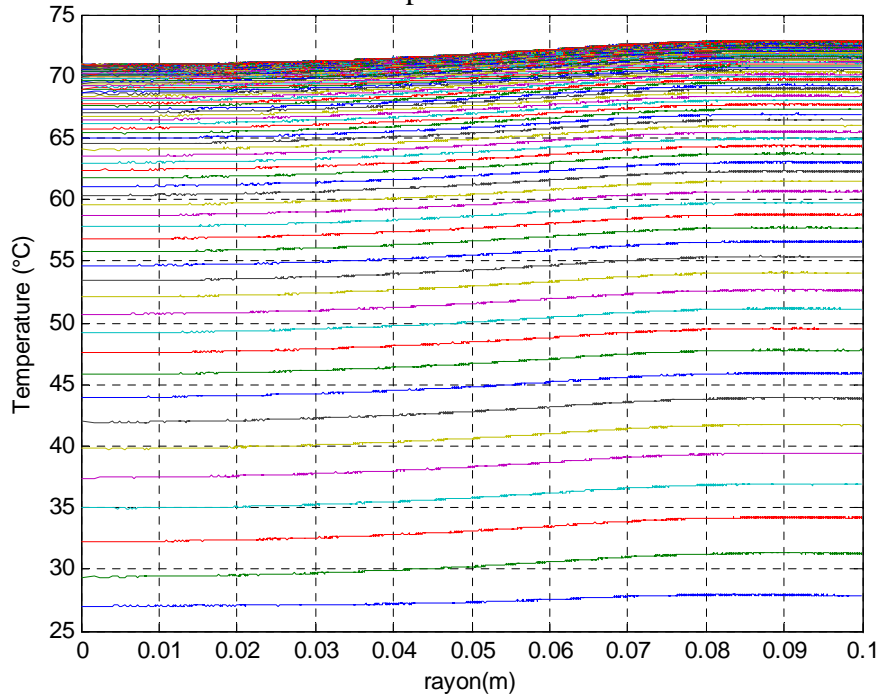
$$\Rightarrow \hat{\mathbf{q}} = (\mathbf{X}^t \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^t \mathbf{T} \quad (3.g)$$

Simulation du modèle

2 cas tests à $P = 20 \text{ W}$

3 Créneau de flux

Profils de température



Densité de Flux estimé

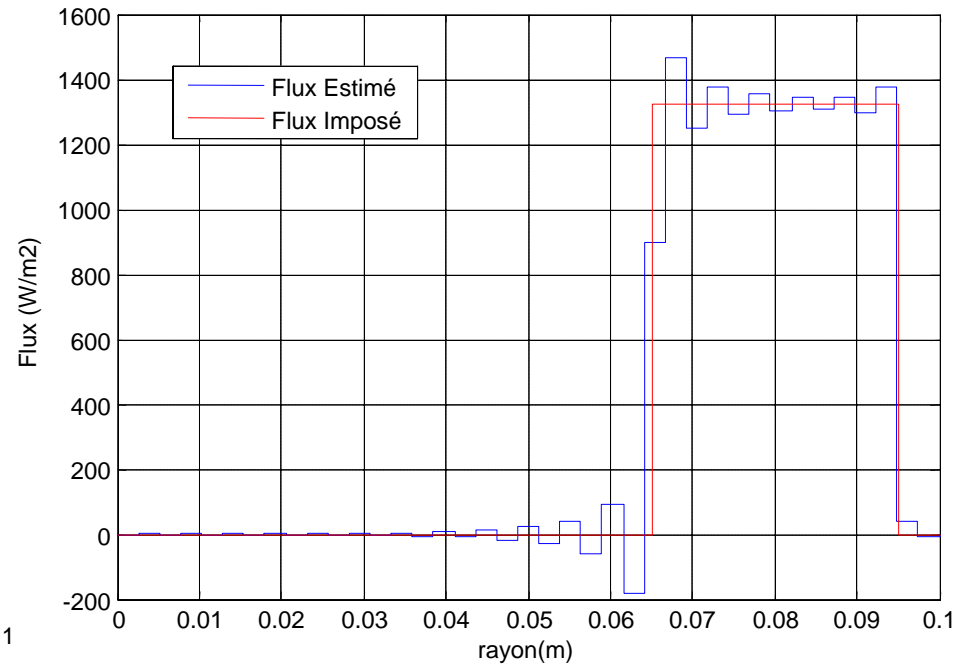


Figure 4: Profils de température et densité de Flux estimé avec un bruit d'écart type = 0.02°C

5 Créneau de flux

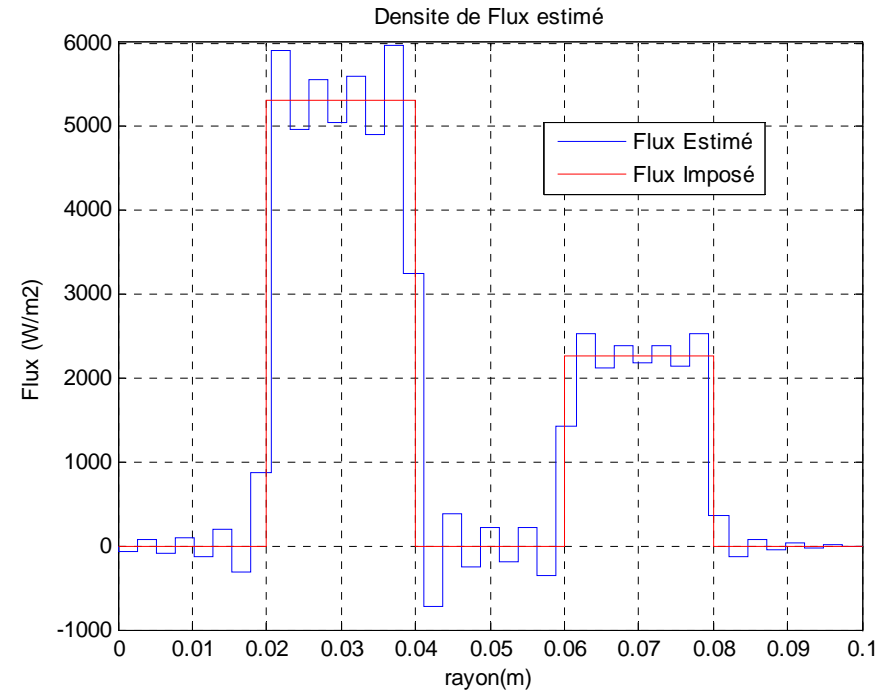
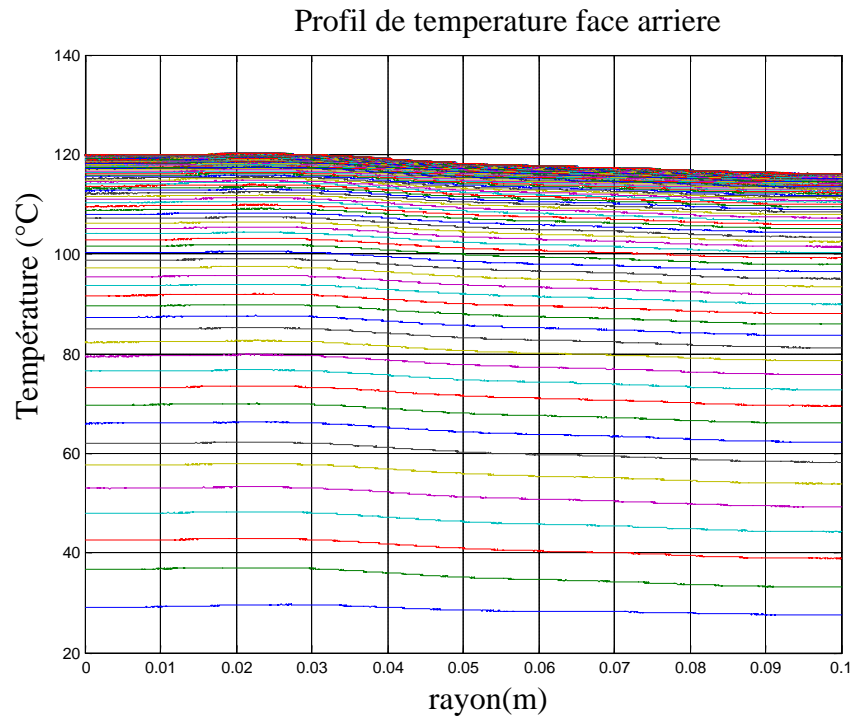


Figure 5: Profils de température et densité de Flux estimé avec un bruit d'écart type = 0.02°C

Image de la rondelle de Nickel donnée par la caméra

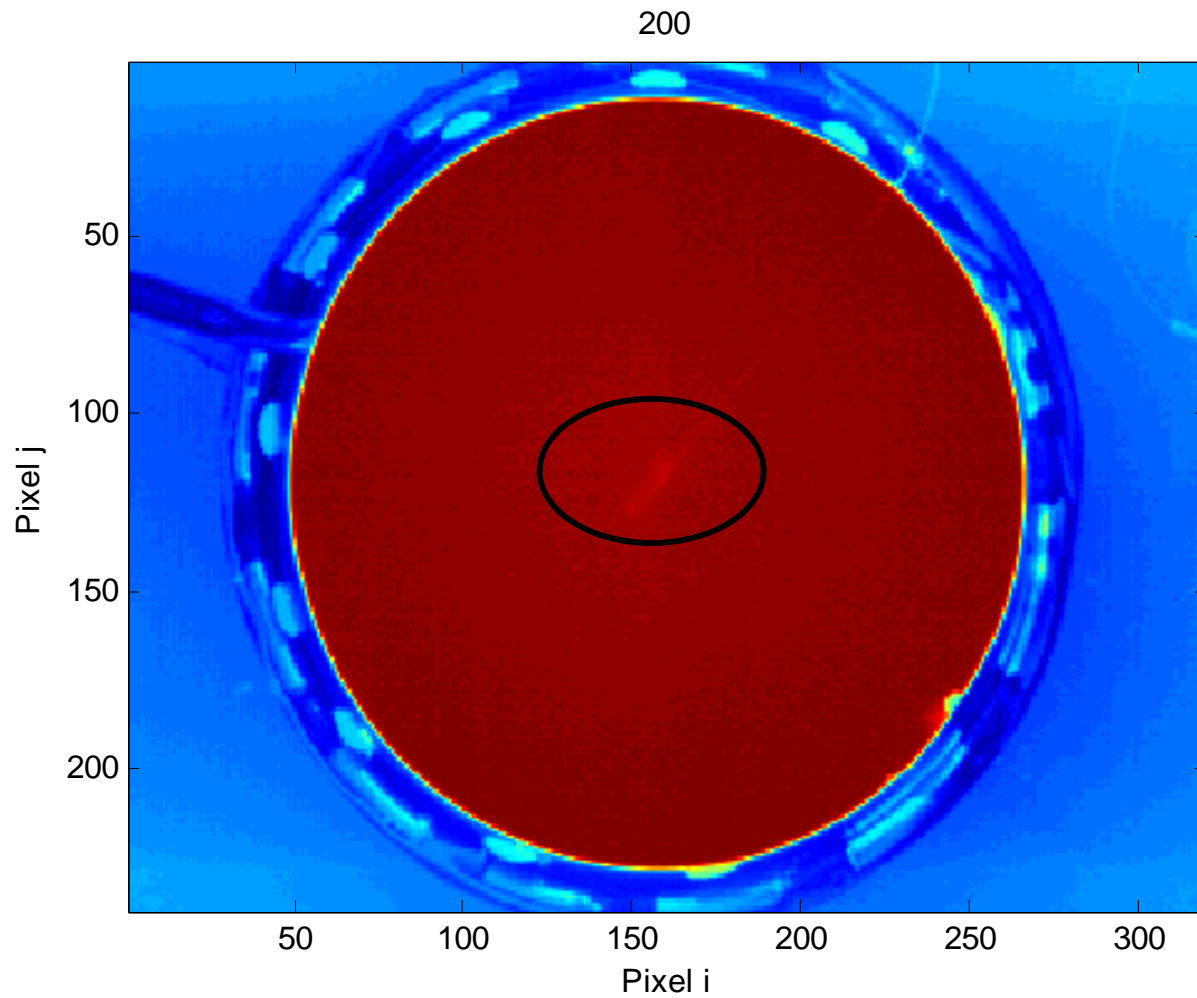


Figure5: Image thermographique de la rondelle

Calcul du nombre de points en rayon

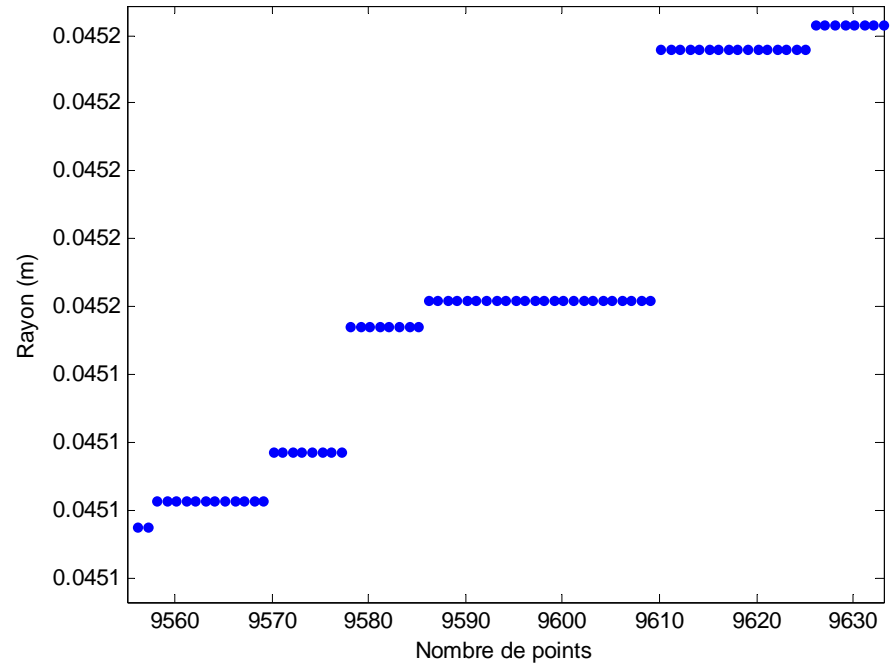
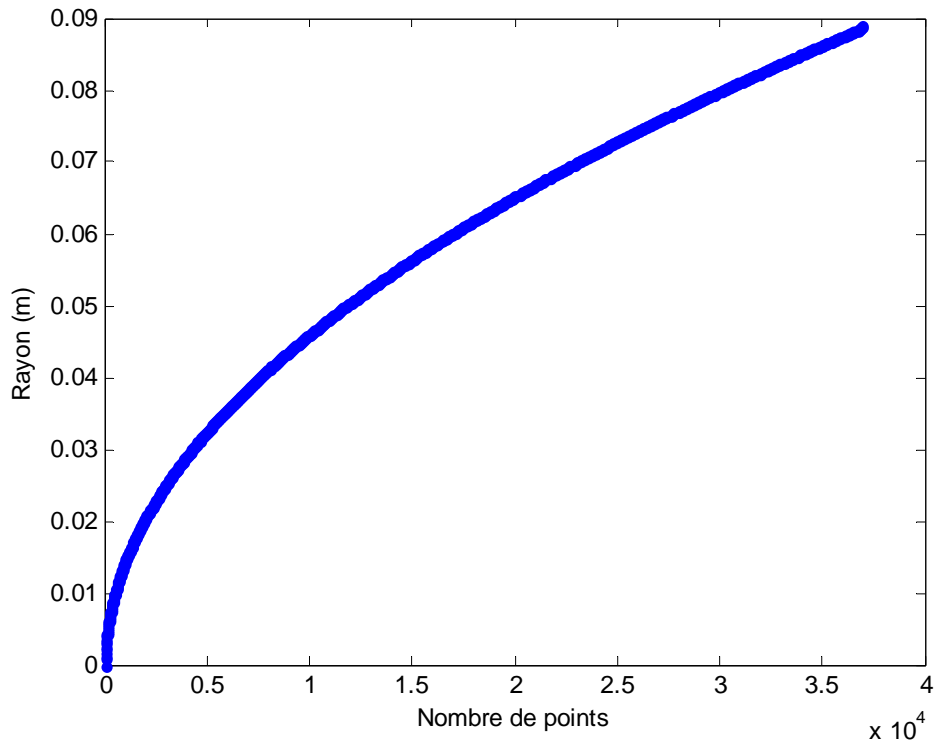


Figure 6: Nombre de points en rayon

● 36947 points → 3228 points utiles

Trame de 200 par 200 pixels utiles

Profil de température

Profil de température au temps final $t_f = 199$ (dernière image) corrigé par rapport à l'image initiale

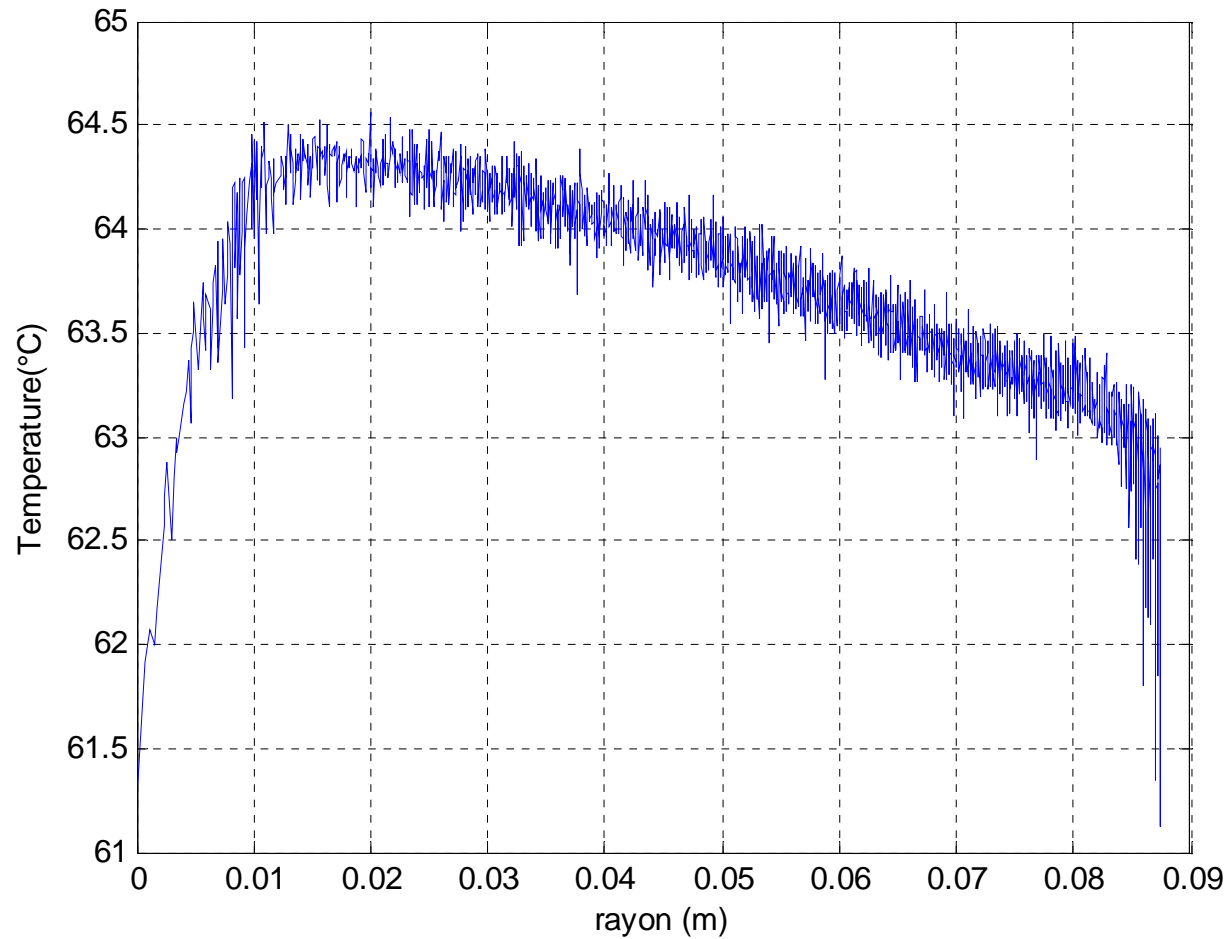


Figure6: Profil de température corrigée par rapport à la température initiale

Densité de flux de chauffage estimé

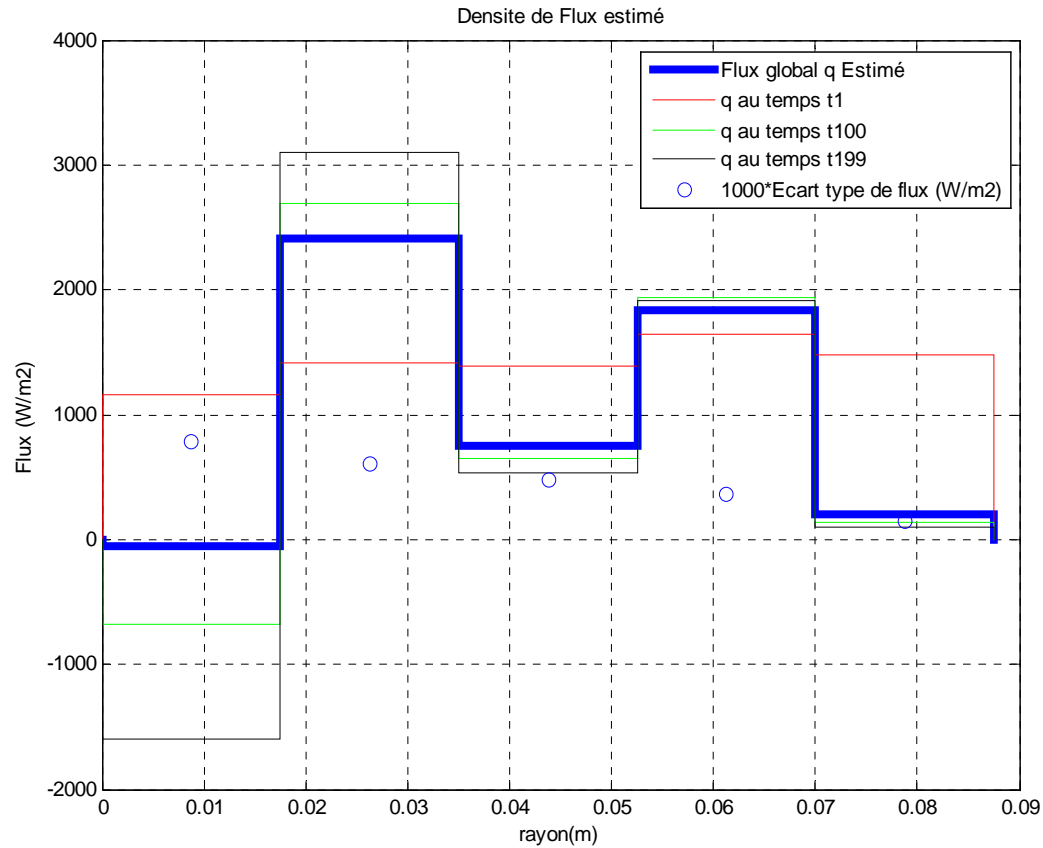
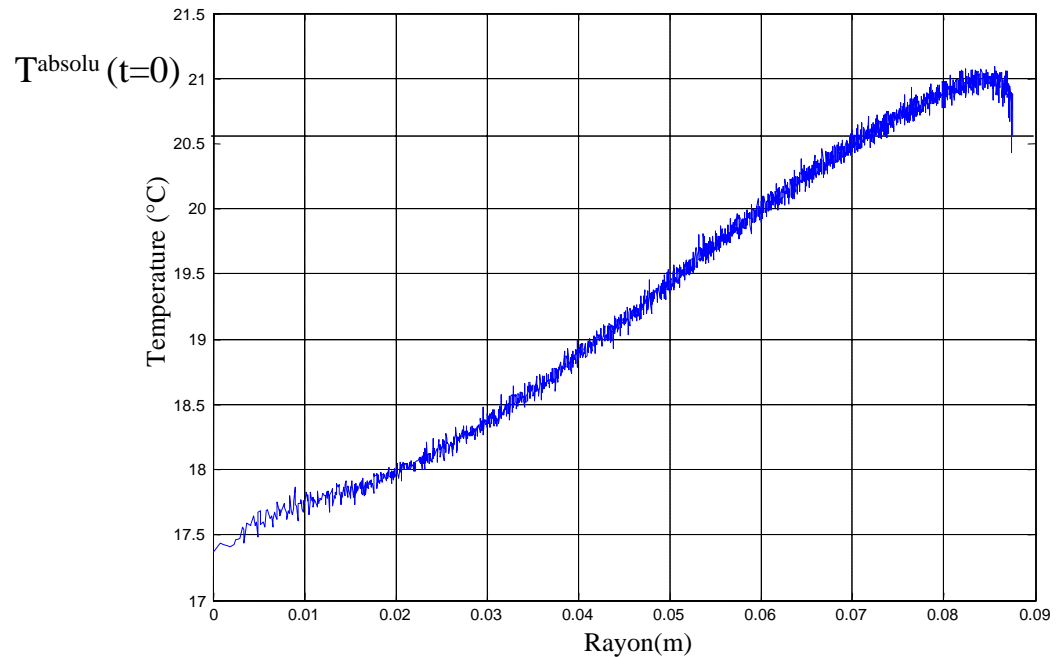
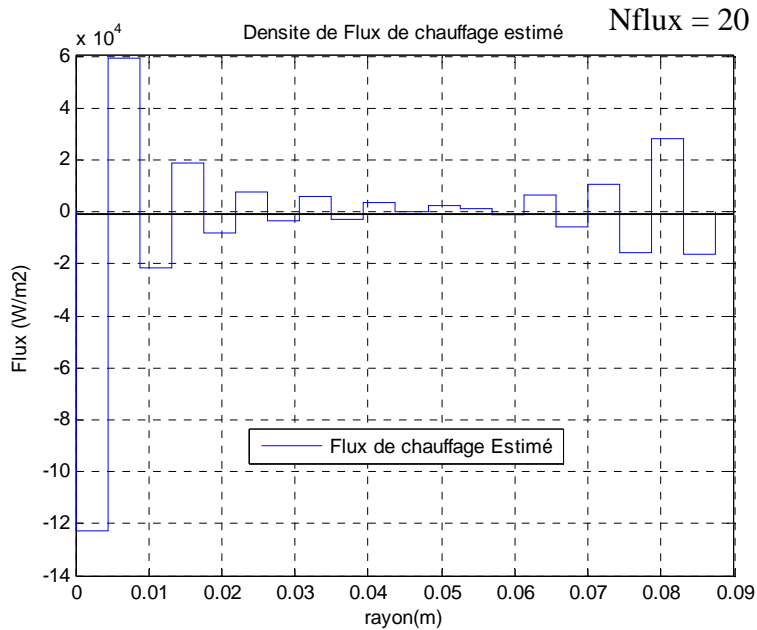
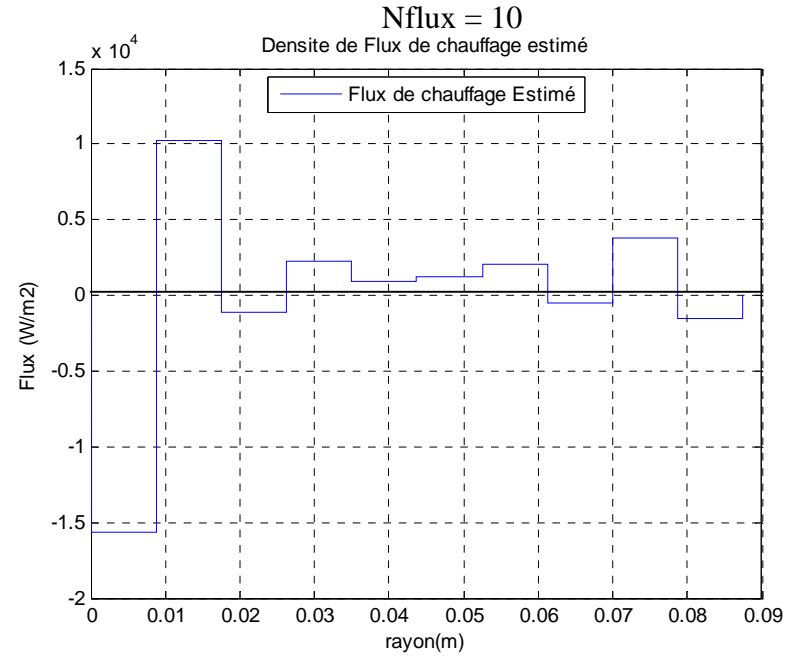
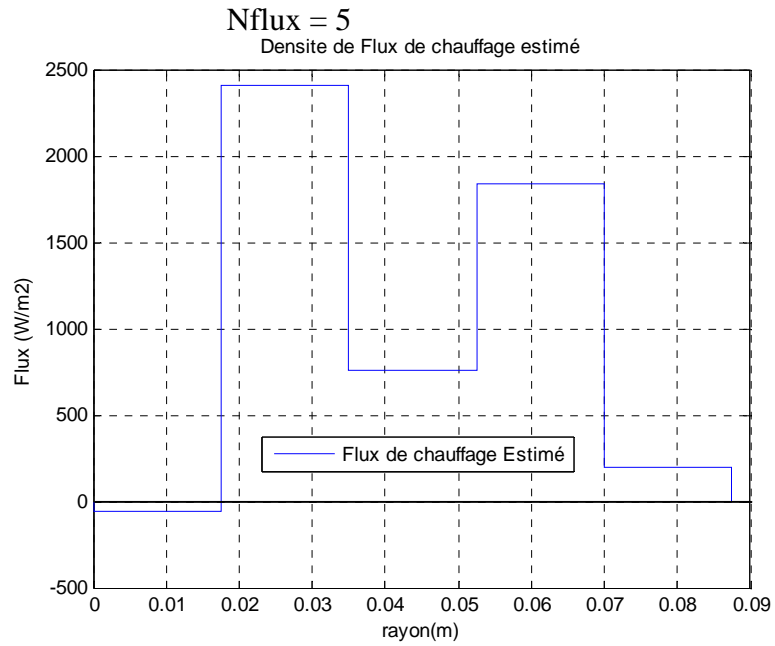


Figure7: Densités de flux estimé

$$\sigma_{\hat{q}_i} = \sigma \left\{ \left[(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \right]_{ii} \right\}^{1/2} \quad \text{avec } \sigma = 0.02^\circ\text{C}$$

$$\hat{\mathbf{q}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{T}_{\text{exp}} \Rightarrow \text{cov}(\hat{\mathbf{q}}) = \sigma^2 (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1}$$

Densité de flux de chauffage estimé



Conclusion et perspectives

● Résultats exploratoires

● Problèmes:

- T initiale
- Thermocouple intrusif, émissivité non uniforme
- Disque excentré

Perspectives:

● Mesures haute température

● Estimation du flux de refroidissement

Merci de votre attention!!!