



Problèmes Inverses de Champs : Apports et limitations de la Thermographie Infrarouge

Détermination du champ de coefficients d'échange convectif sur une plaque mince par thermographie infrarouge

École des Mines de DOUAI

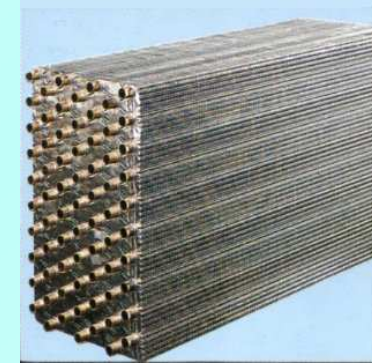
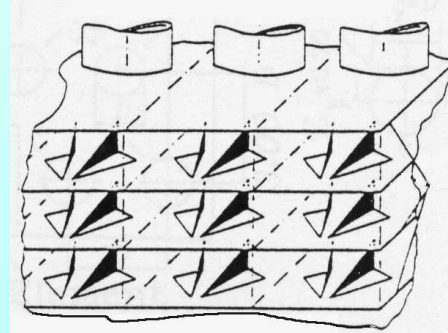
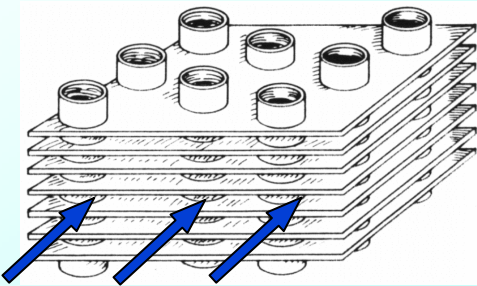
941 rue Charles Bourseul - B.P. 838 - 59508 DOUAI

Département Énergétique Industrielle

Daniel Bougeard, Serge Russeil, Abdelilah EL Abbadi



■ Intensification par promoteurs de tourbillon

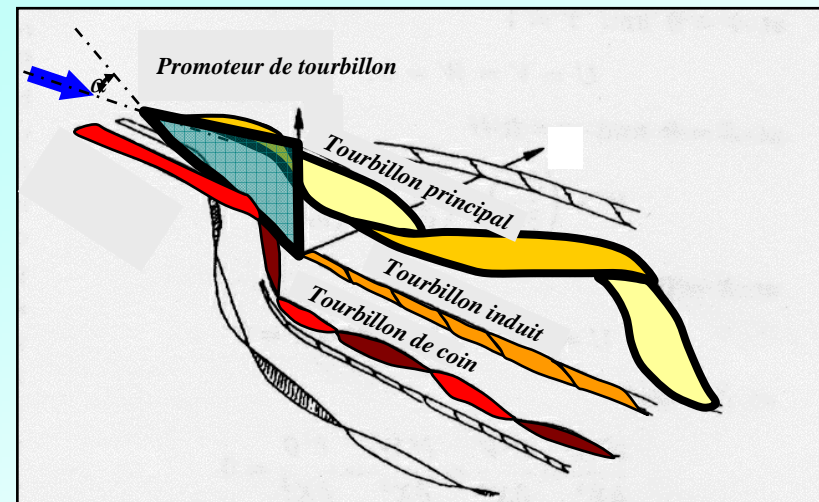
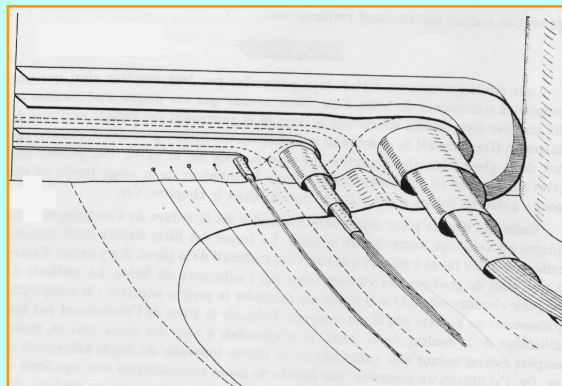


■ *Expérimental*

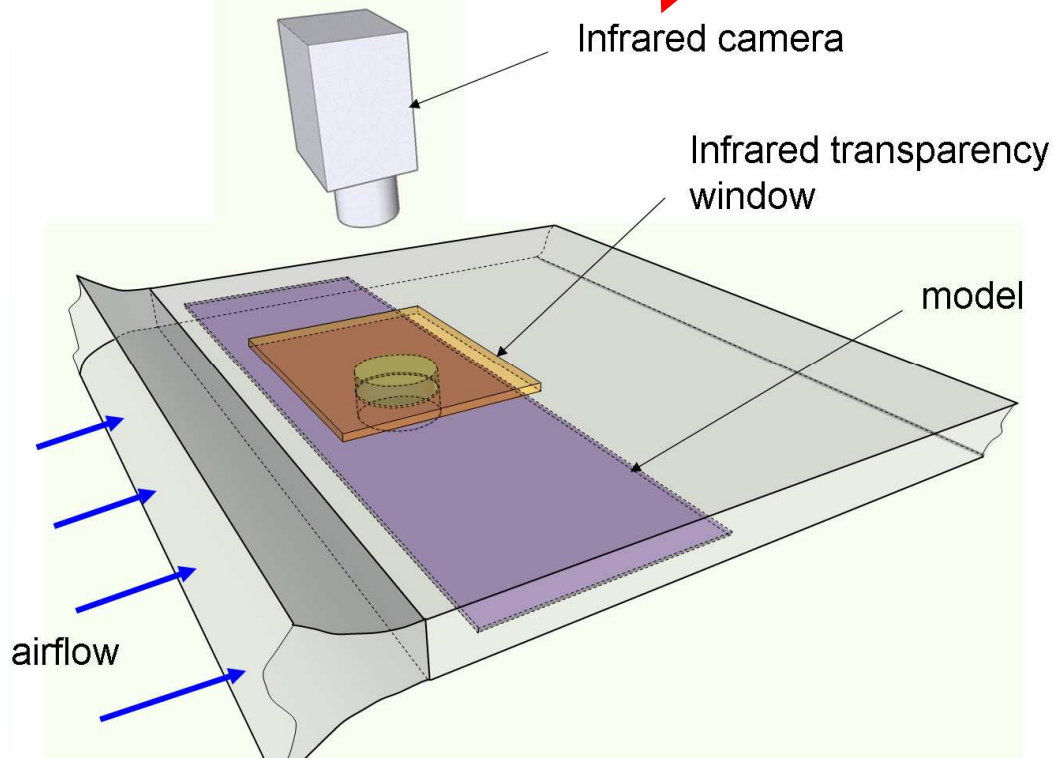
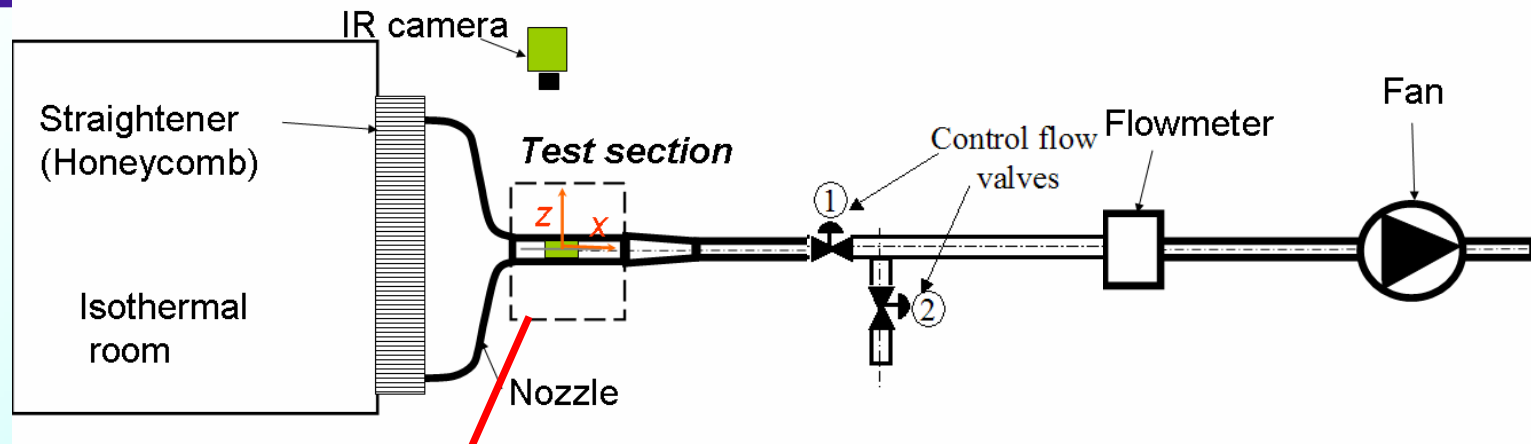
- *IR, PIV, LDV, Veines hydrodynamique & aéraulique*

■ *Simulations numériques*

Tourbillon fer à cheval (HSV)

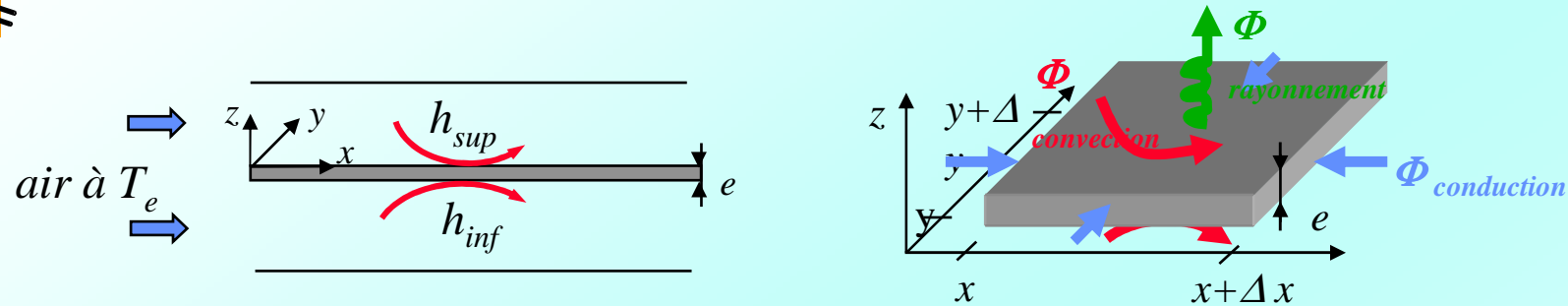


Technique d'investigation locale IR – Banc d'essai





Technique d'investigation locale IR – modèle « LCM »



$$\text{Eq. Energie : } m_{\text{ail}} \frac{\partial H_{\text{ail}}}{\partial t} = \phi_{\text{cv}} + \phi_{\text{cond}} + \phi_{\text{ray}}$$

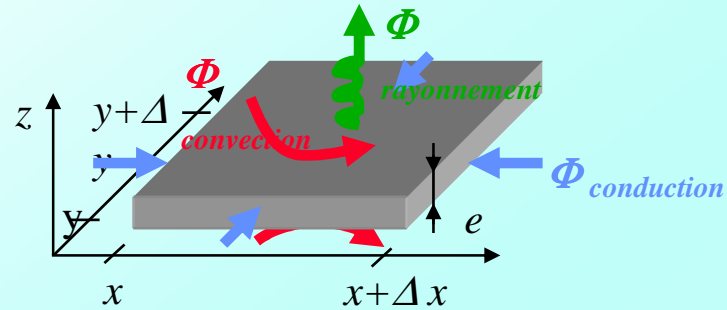
Hypothèses ❶ $\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial z} \approx 0$ ❷ $\phi_{\text{cond}} \approx \phi_{\text{ray}} \approx 0$ ❸ h constant durant le test

$$\rho_{\text{ail}} C_{p_{\text{ail}}} e_{\text{ail}} \frac{\partial T_{\text{ail}}(x, y, t)}{\partial t} = 2 h_{\text{log}}(x, y) (T_e - T_{\text{ail}}(x, y, t)) \quad \text{avec} \quad h_{\text{log}}(x, y) = \frac{h_{\text{sup}} + h_{\text{inf}}}{2}$$

$$h_{\text{log}}(x, y) = \frac{\rho_{\text{ail}} C_{p_{\text{ail}}} e_{\text{ail}}}{2(tf - ti)} \ln \left(\frac{T_e - T_{\text{ail}}(x, y, ti)}{T_e - T_{\text{ail}}(x, y, tf)} \right)$$

h_{log} à température d'ailette uniforme

Technique d'investigation locale IR – modèle « intégrale »



$$\rho \cdot C_p \cdot e \cdot \int_{t_i}^{t_f} \frac{dT(x,y,t)}{dt} dt = h \cdot 2 \cdot \int_{t_i}^{t_f} (T(x,y,t) - T_{ref}) dt + \lambda \cdot e \cdot \int_{t_i}^{t_f} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) dt + \varepsilon \cdot \sigma \cdot 2 \cdot \int_{t_i}^{t_f} (T(x,y,t)^4 - T_{rad}^4) dt$$

$$h_{(x,y)} = \frac{I_{total} - I_{cond} - I_{rad}}{I_{temp}}$$

$$I_{cond} = \lambda_f \cdot e_f \cdot \Delta t \cdot \sum_{i=1}^m \left(\frac{\nabla^2 T}{4 \cdot s^2} \right)$$

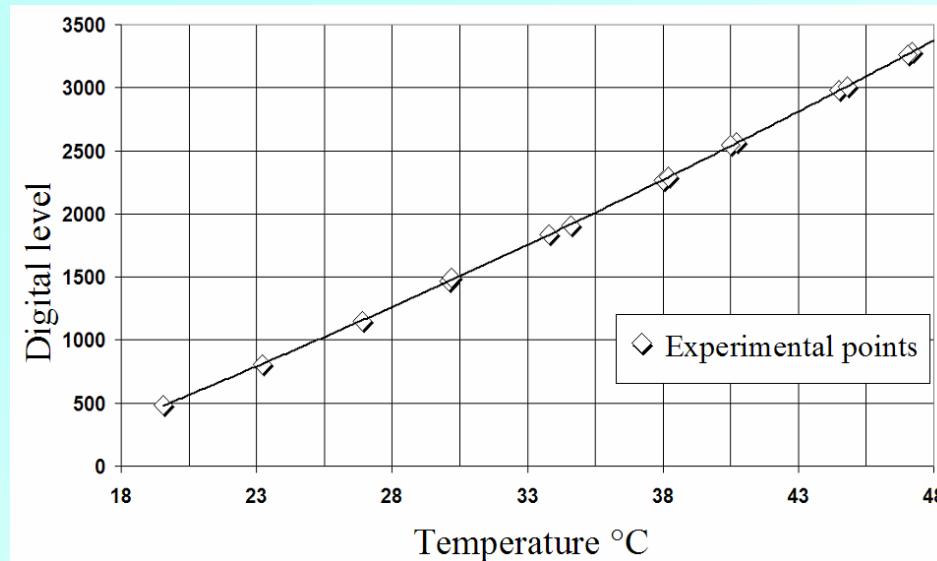
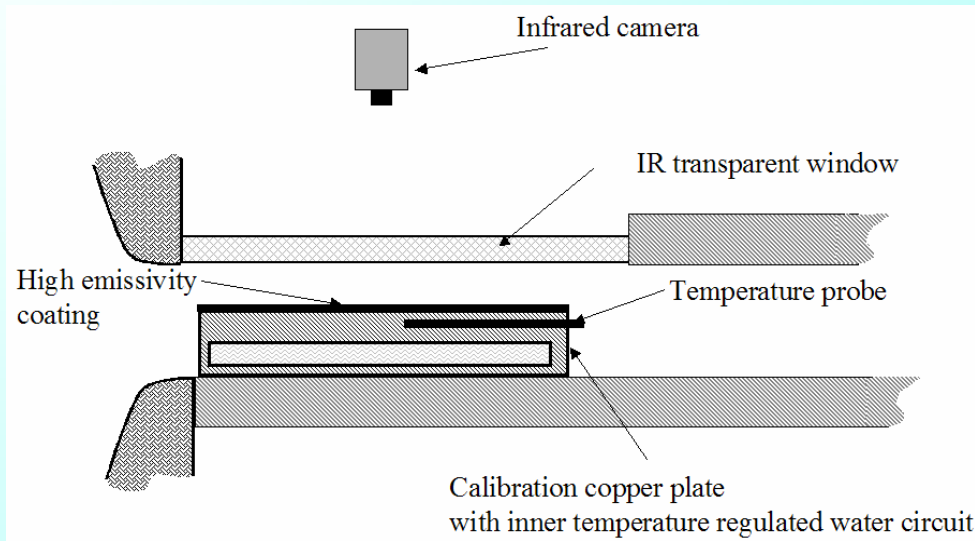
$$I_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \Delta t \cdot 2 \cdot \sum_{i=1}^m (T_i^4 - T_{rad}^4)$$

$$I_{total} = \rho_f \cdot C_{p_f} \cdot e_f \cdot \sum_{i=1}^m (T_i - T_{i+1})$$

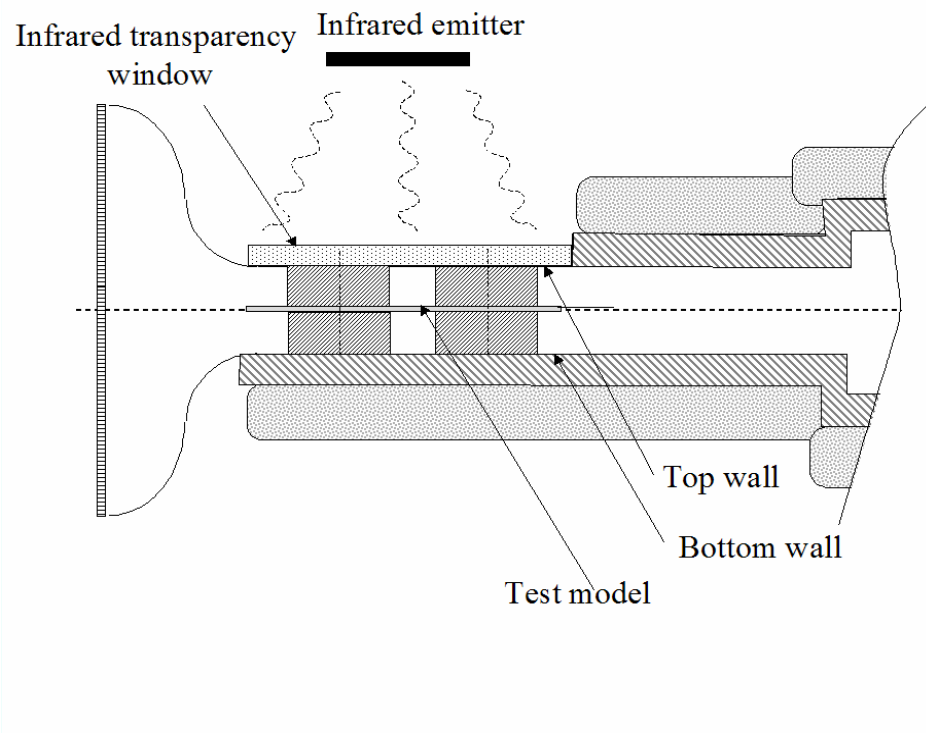
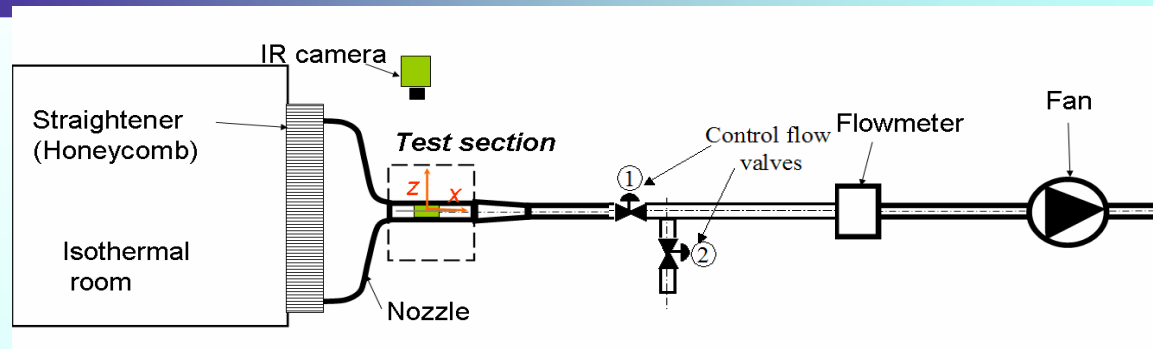
$$I_{temp} = \Delta t \cdot 2 \cdot \sum_{i=1}^m (T_i - T_{ref})$$



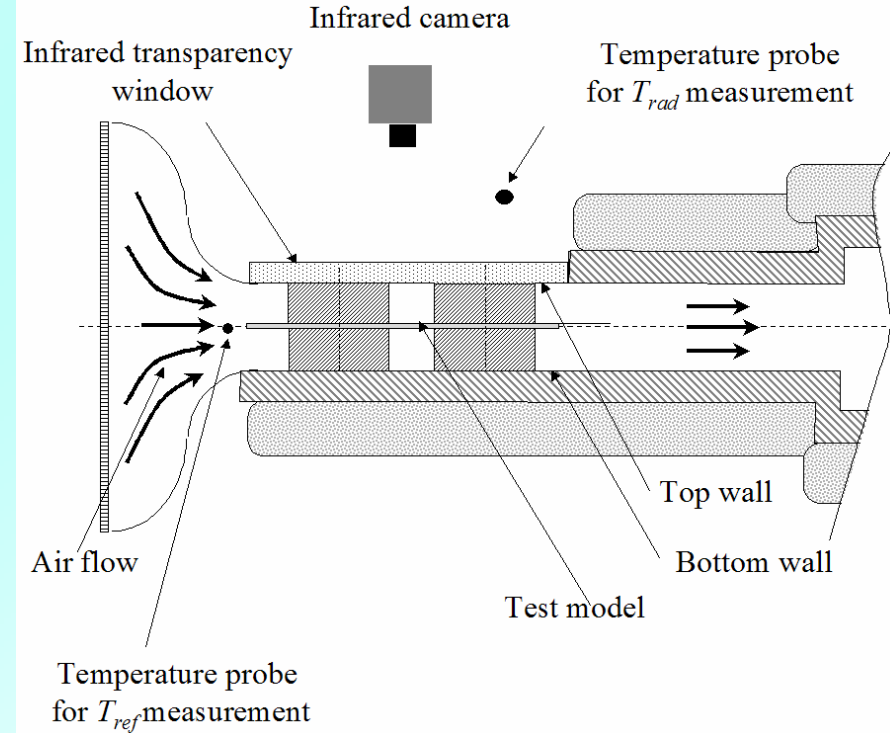
Technique d'investigation locale IR – mesure température



Technique d'investigation locale IR - procédure expérimentale

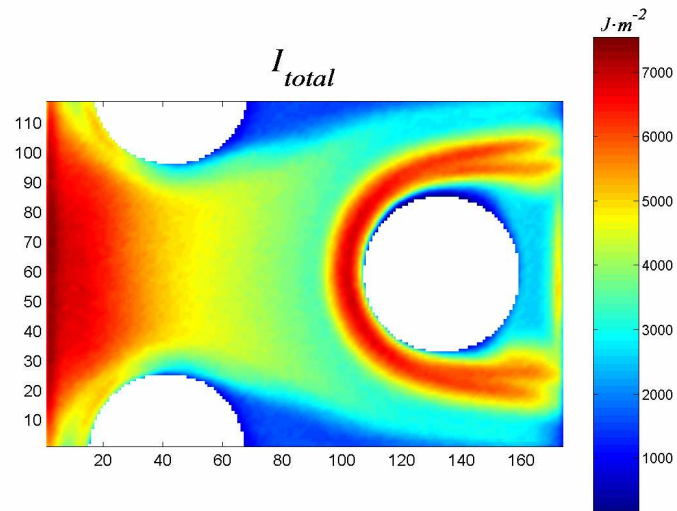


(a) first period heating

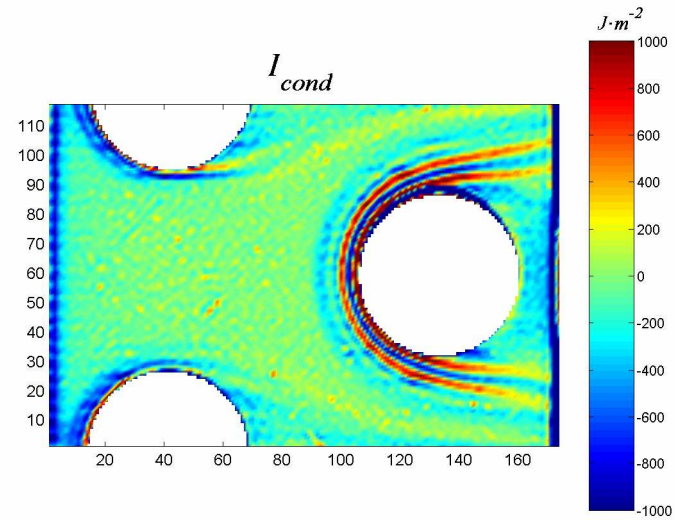


(b) second period recording

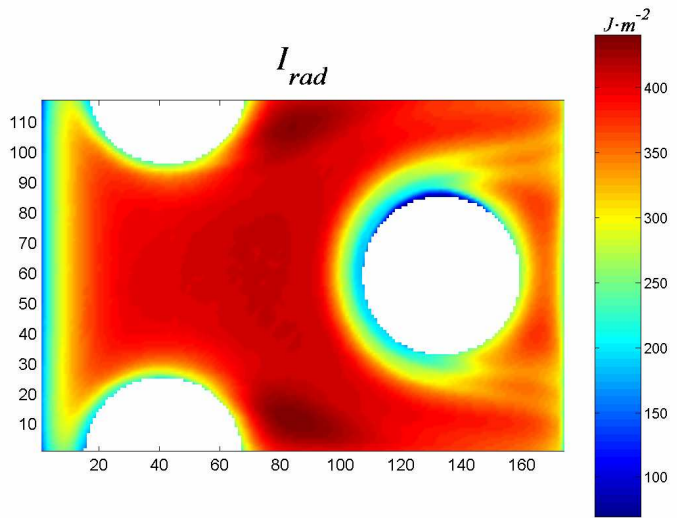
Technique d'investigation locale IR - résultats



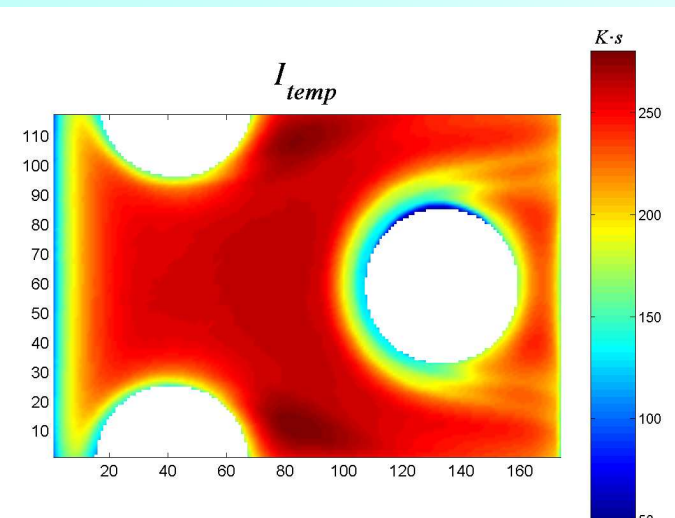
(a) total energy exchange



(b) energy exchange by conduction

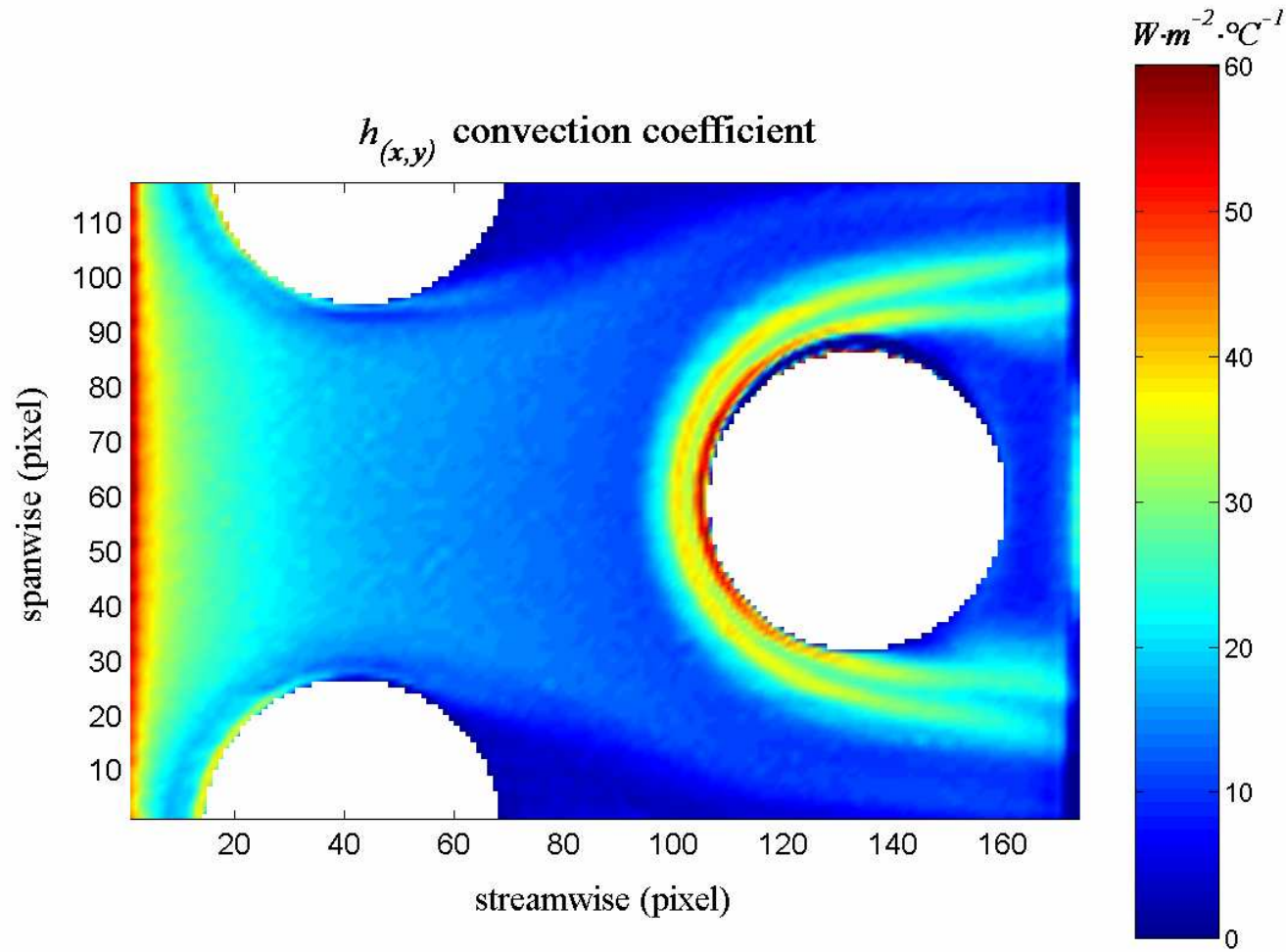


(c) energy exchanged by radiation



(d) temperature integration

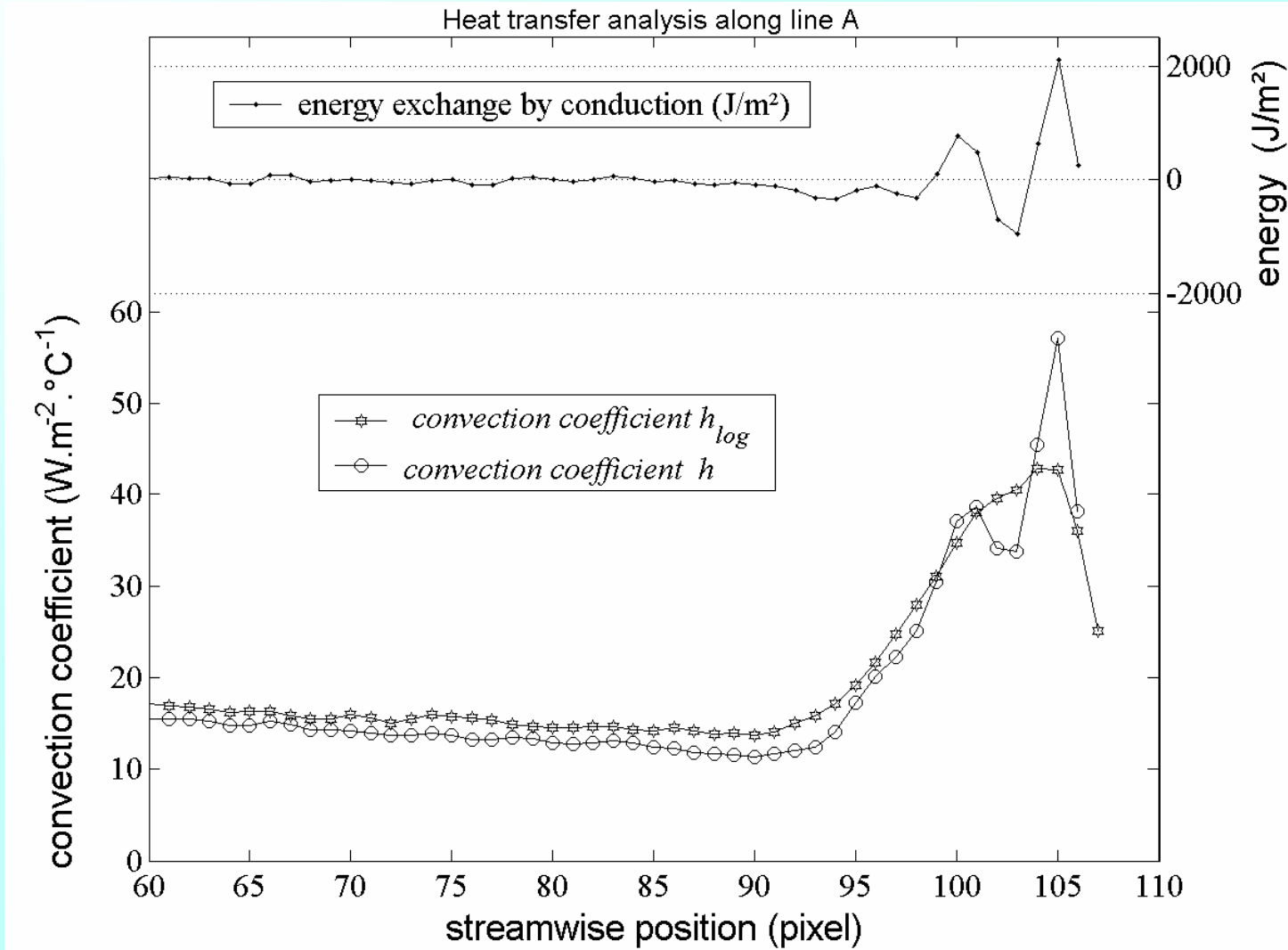
Technique d'investigation locale IR - résultats



(e) convection coefficient distribution



Technique d'investigation locale IR - résultats

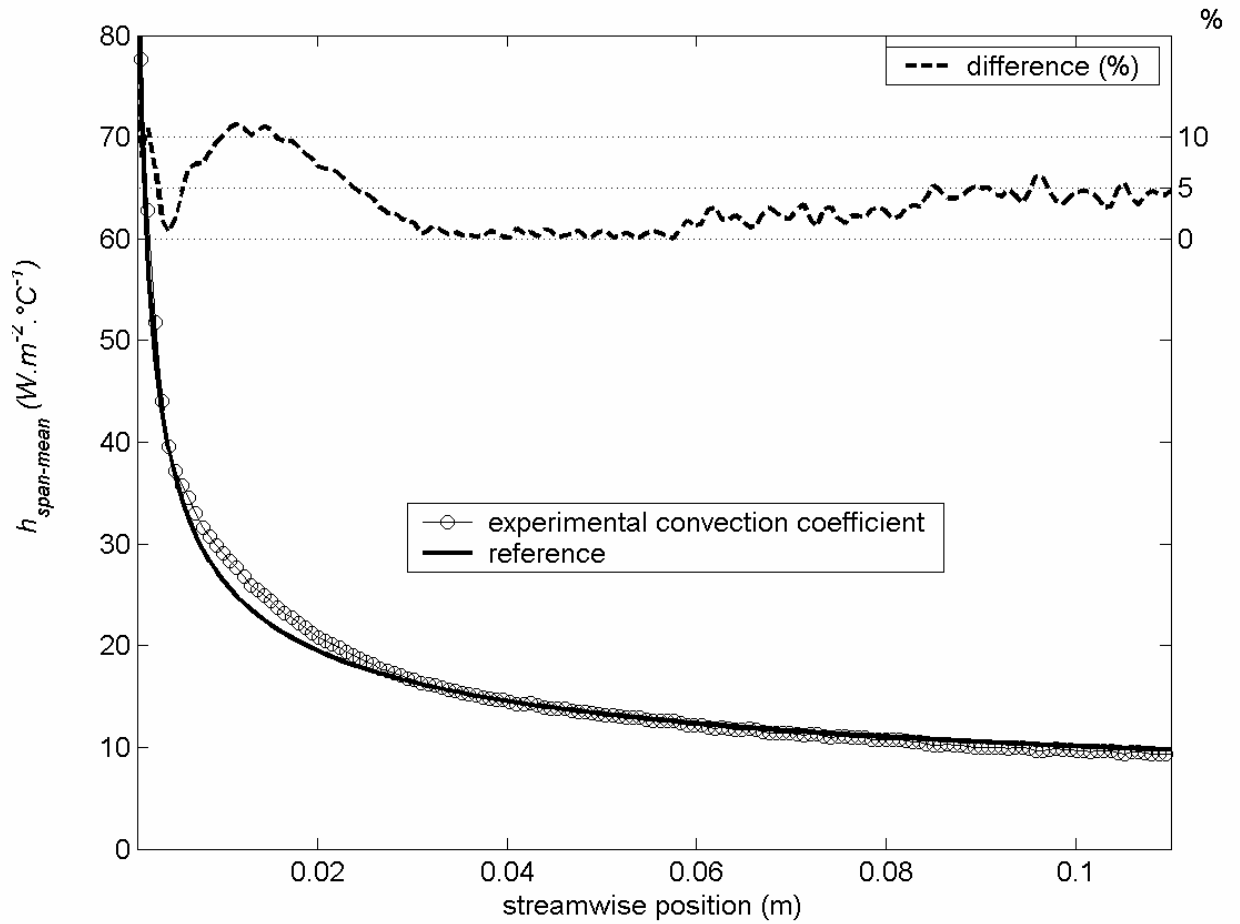
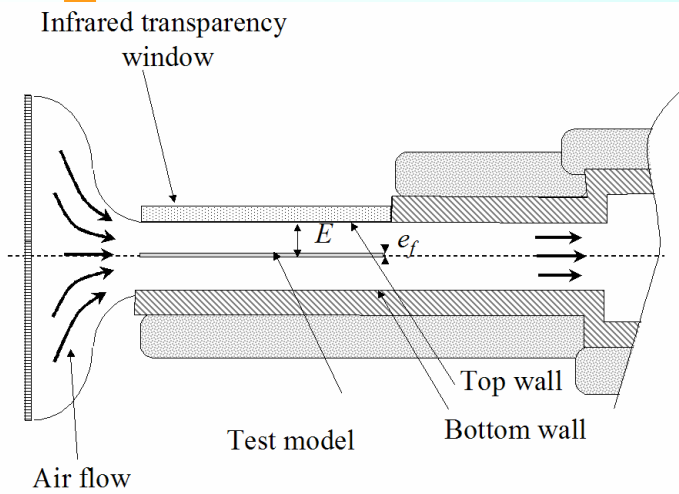




Technique d'investigation locale IR - validation



Plate flow experiment configuration



Span-averaged convection coefficient for plate flow experiment



Analyse de l'hypothèse d'invariance temporelle



h_{log} constant au cours du temps ?

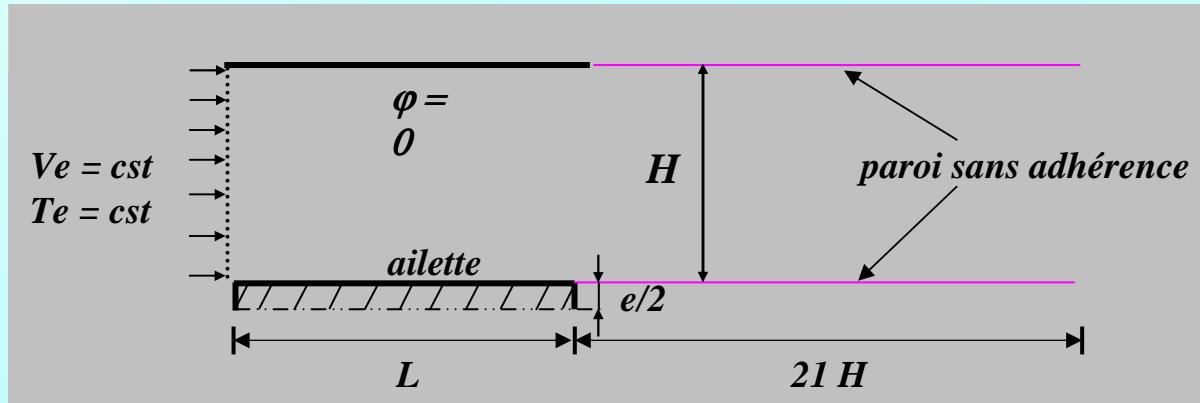
✓ **Simulation numérique (Fluent)**

▪ **calcul stationnaire :**

- à *Tail uniforme*
- et *non uniforme*

▪ **calcul instationnaire :**

- *Tail uniforme à l'instant initial (t = 0)*



3 ailettes testées :

PVC (0.1W/m.K), Verre (1.15 W/m.K)

et Inox (12 W/m.K)

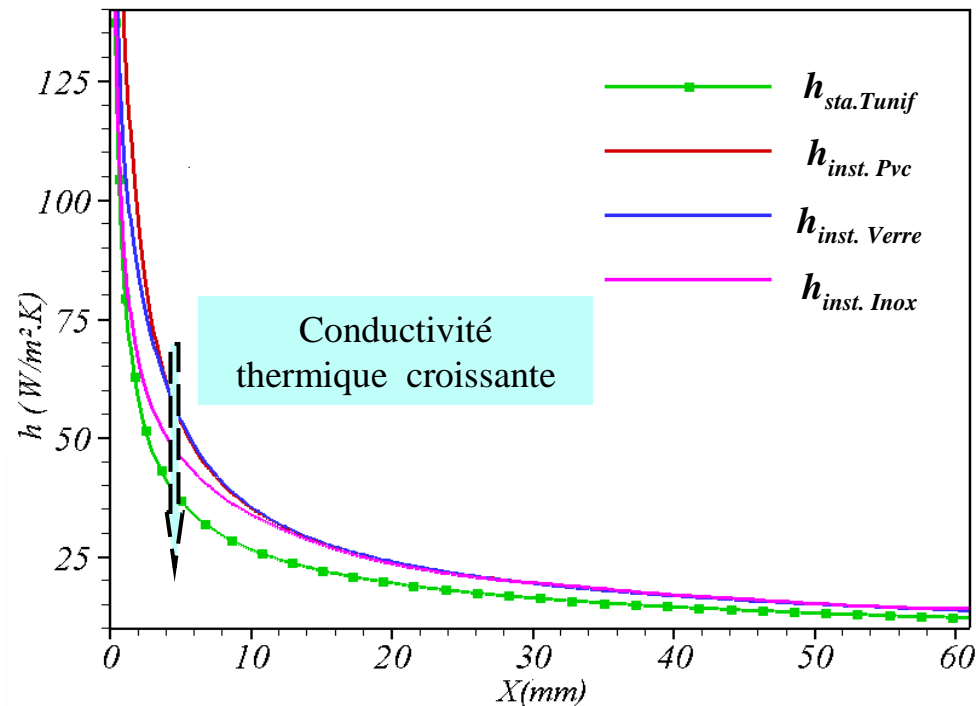
Paramètre	PVC	Verre	Acier inox
$e (mm)$	0.4	0.2944	0.1962
$C_p(J.K^{-1}.Kg^{-1})$	1180	840	450
$\rho(kg/m^3)$	1310	2500	7000
$\lambda(W.m^{-1}.K^{-1})$	0.1	1.15	12
$a = \frac{\lambda}{\rho C_p} (cm^2/s)$	6.47×10^{-4}	5.48×10^{-3}	3.8×10^{-2}



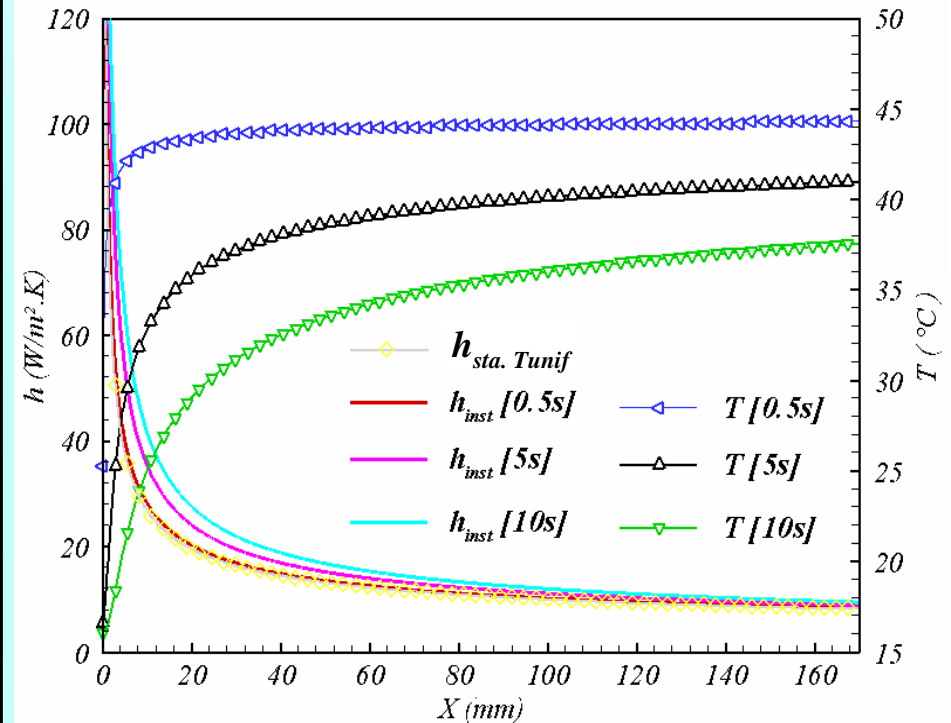
Analyse de l'hypothèse d'invariance temporelle



✓ $h(t = 5s)$ pour les trois ailettes



✓ $h(t)$ instationnaire sur l'ailette en PVC



➤ l'écart entre h instationnaire et h stationnaire est plus important dans le cas du PVC (*matériau de faible conductivité thermique*) ceci est d'autant plus vrai au début qu'à la fin de l'ailette.

➤ h de l'acier est le plus proche du h stationnaire.

➤ à partir d'une distance « $D=20\text{mm}$ », l'écart est le même dans le cas des trois matériaux.

➤ h est fonction de la répartition du champ de température

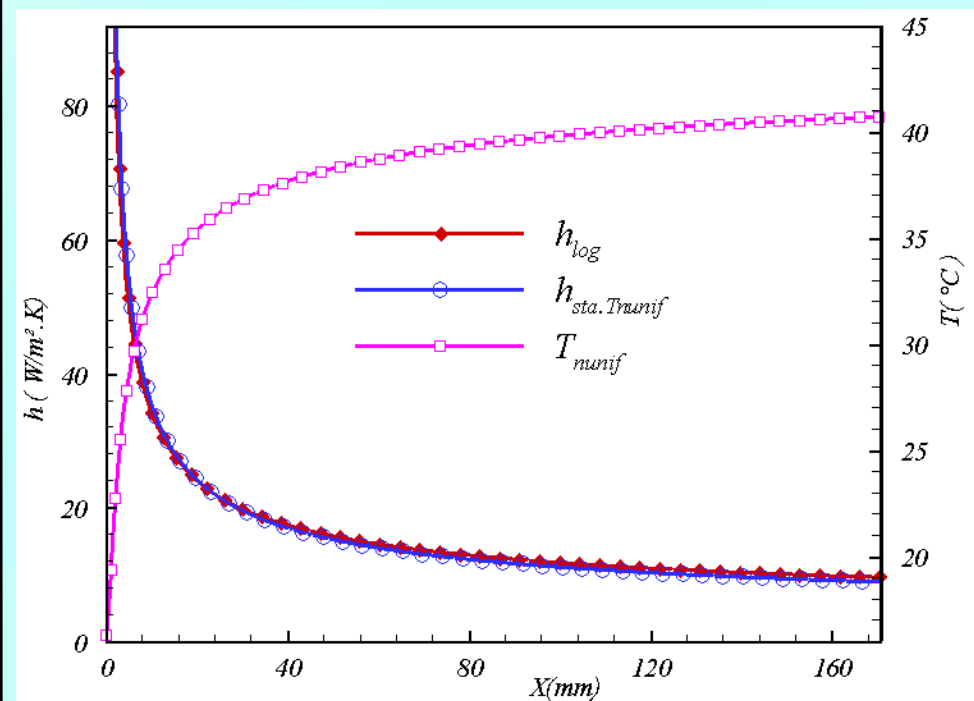
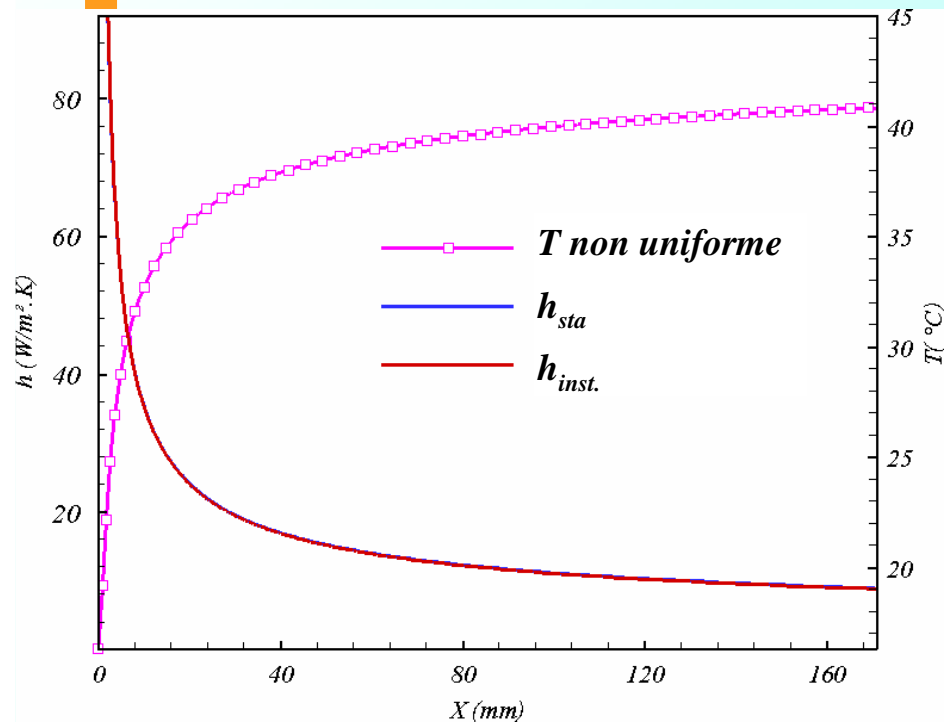
➤ plus la répartition de température est uniforme plus h se rapproche d'un h à température uniforme.



Analyse de l'hypothèse d'invariance temporelle



✓ champ de température à la surface de l'ailette non uniforme = $T_{ail}(t=5s)$



➤ Le coefficient de transfert thermique **instationnaire** est le même que le coefficient de transfert **stationnaire** à **Température non uniforme**

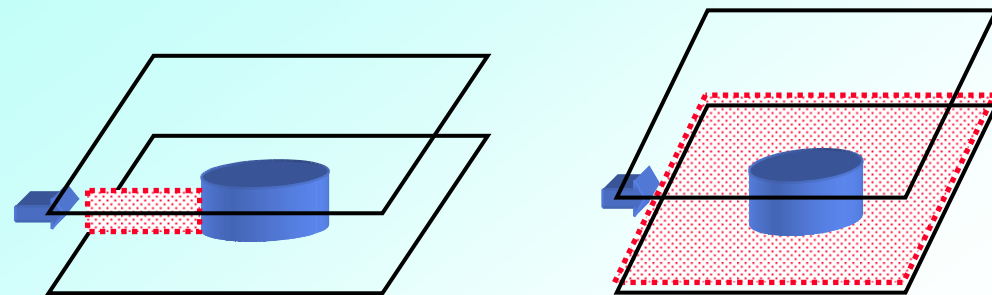
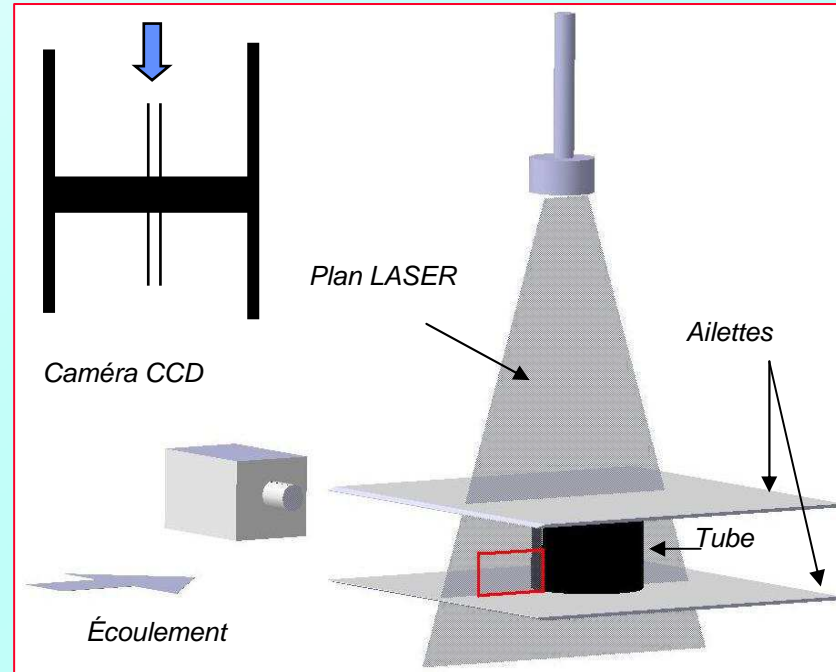
➤ Le coefficient de transfert thermique calculé par la **méthode transitoire** classique $h_{log}(t=5s)$ est le même que le coefficient de transfert **stationnaire** à température **non uniforme** = $T_{ail}(t=5s)$



Investigation expérimentale PIV/ IR - Tubes insérés entre deux ailettes

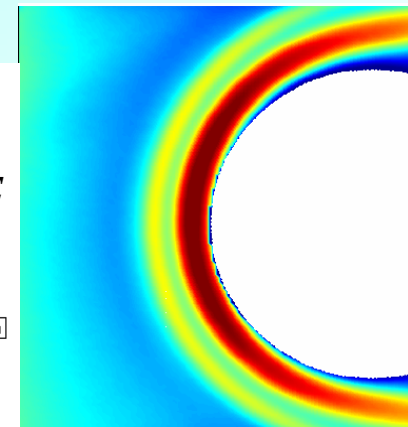
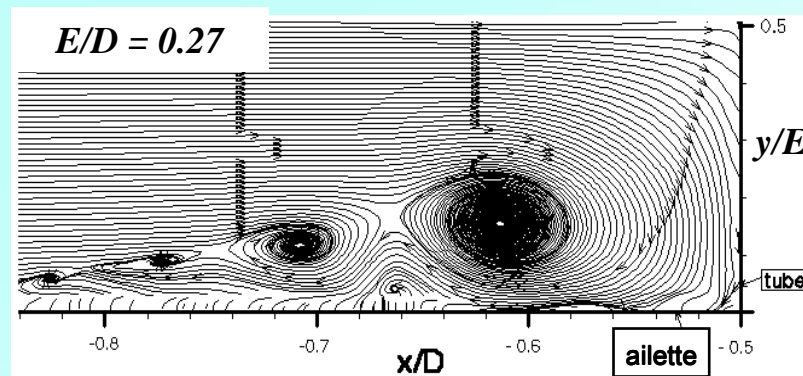
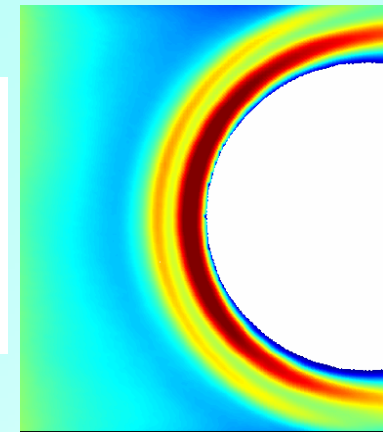
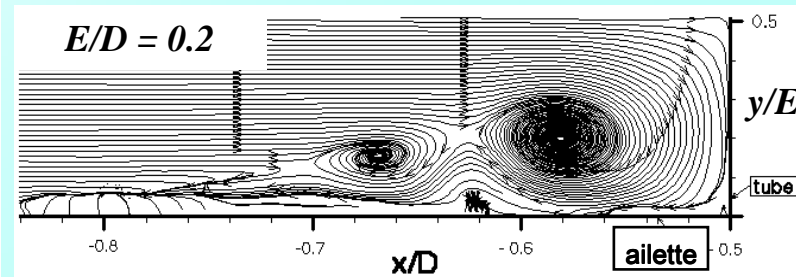
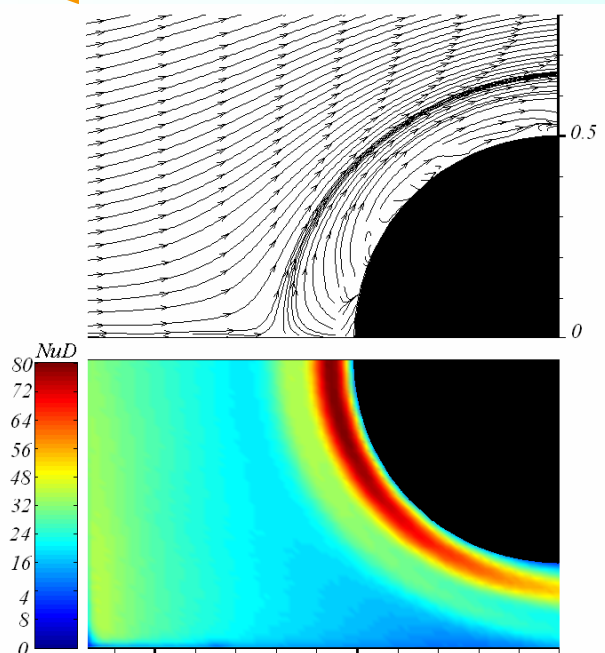


■ Etude par PIV





Comparaison entre les résultats thermiques (IR) et dynamiques (PIV)



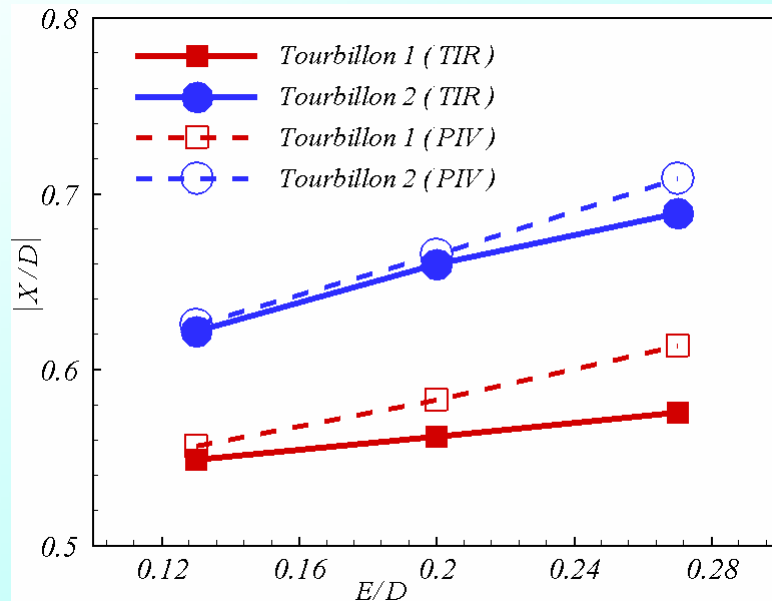


Comparaison entre les résultats thermiques (IR) et dynamiques (PIV)

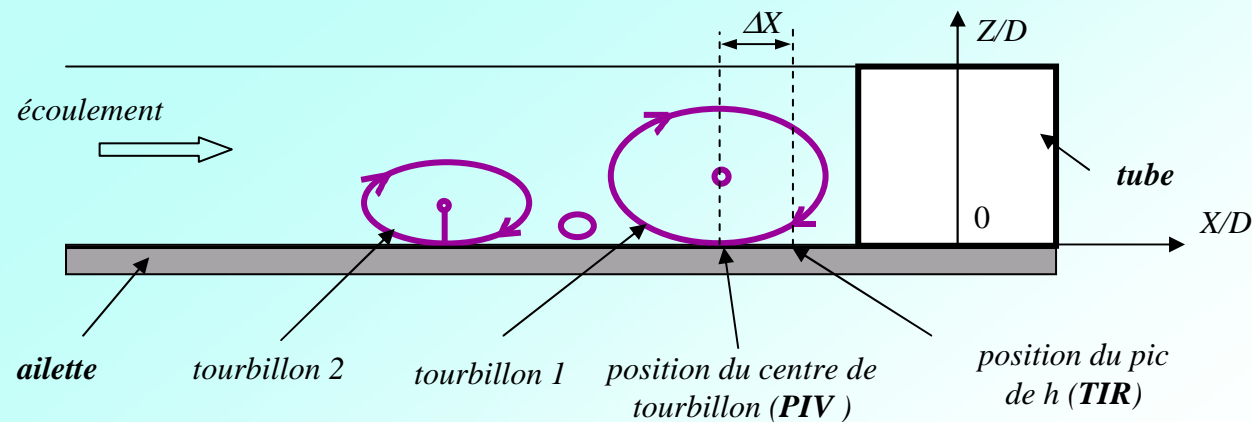
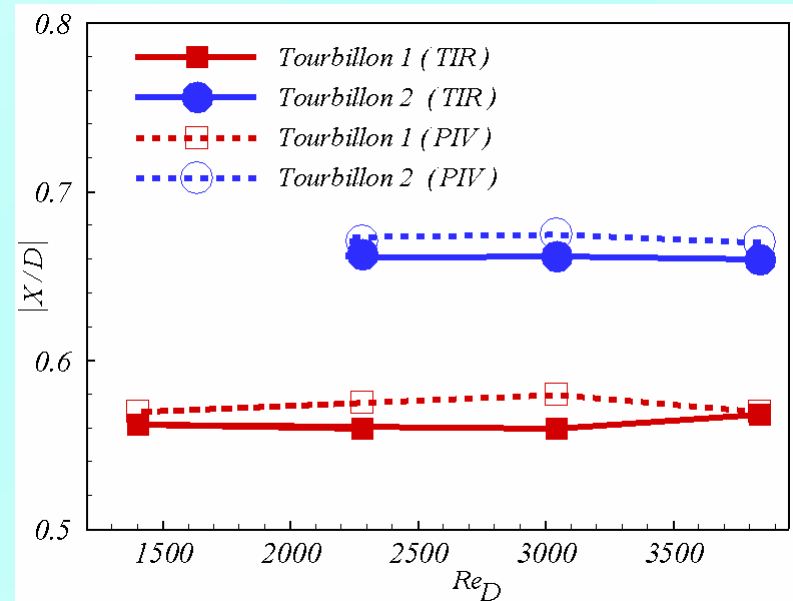


✓ Position des tourbillons et du maximum du transfert thermique

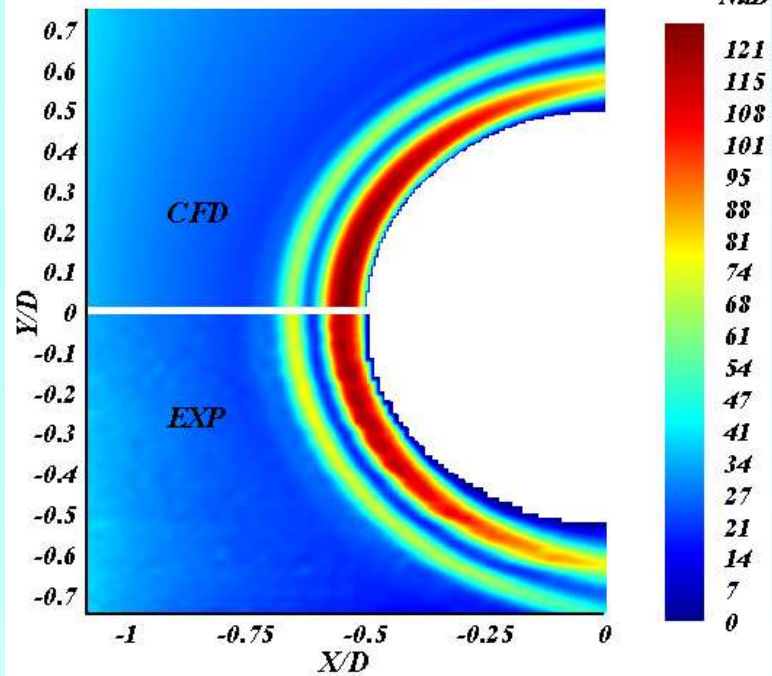
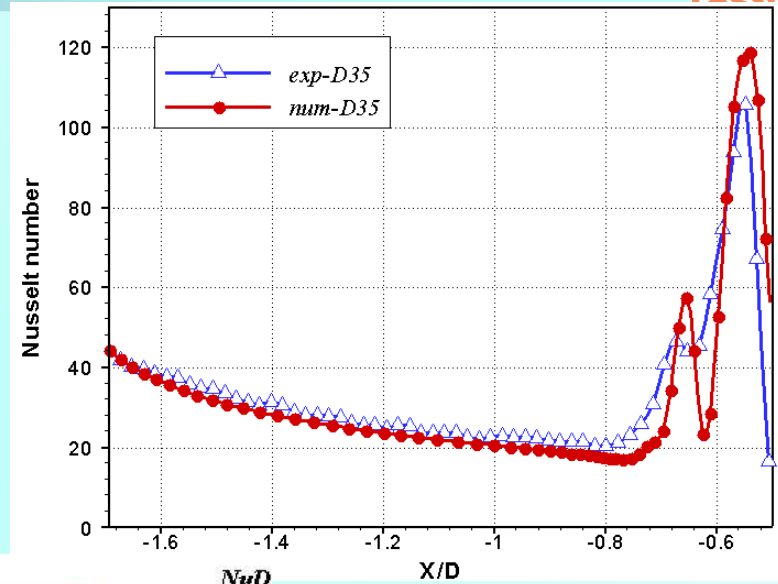
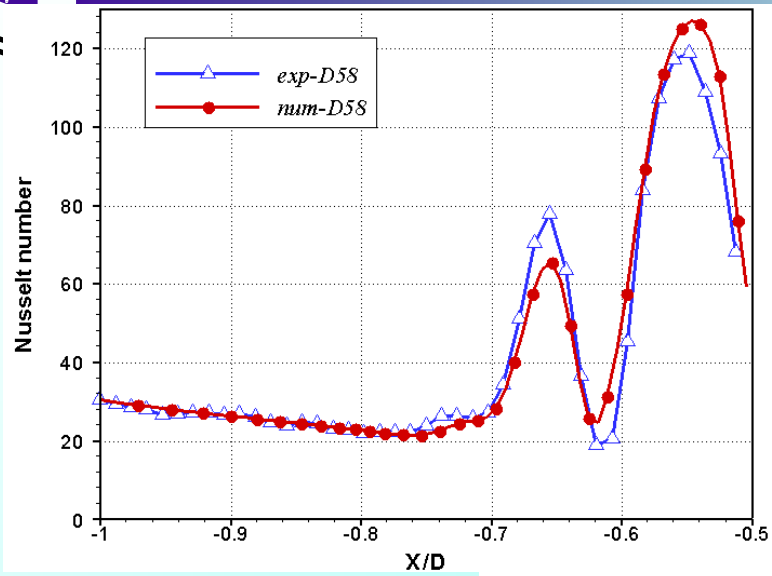
➤ Effet l'espacement inter-ailettes



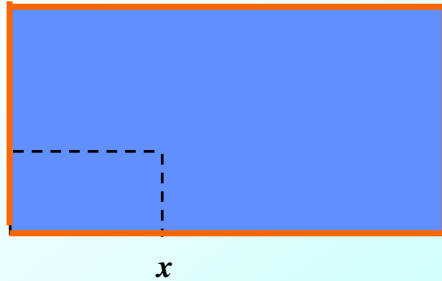
➤ Effet la vitesse d'écoulement



Comparaison entre les résultats thermiques (IR) et numérique (CFD)



Méthode inverse : méthode de spécification de fonction



$$\rho \cdot C_p \cdot e \cdot \frac{dT(x,y,t)}{dt} = \lambda \cdot e \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + h(x,y) \cdot 2 \cdot (T(x,y,t) - T_e)$$

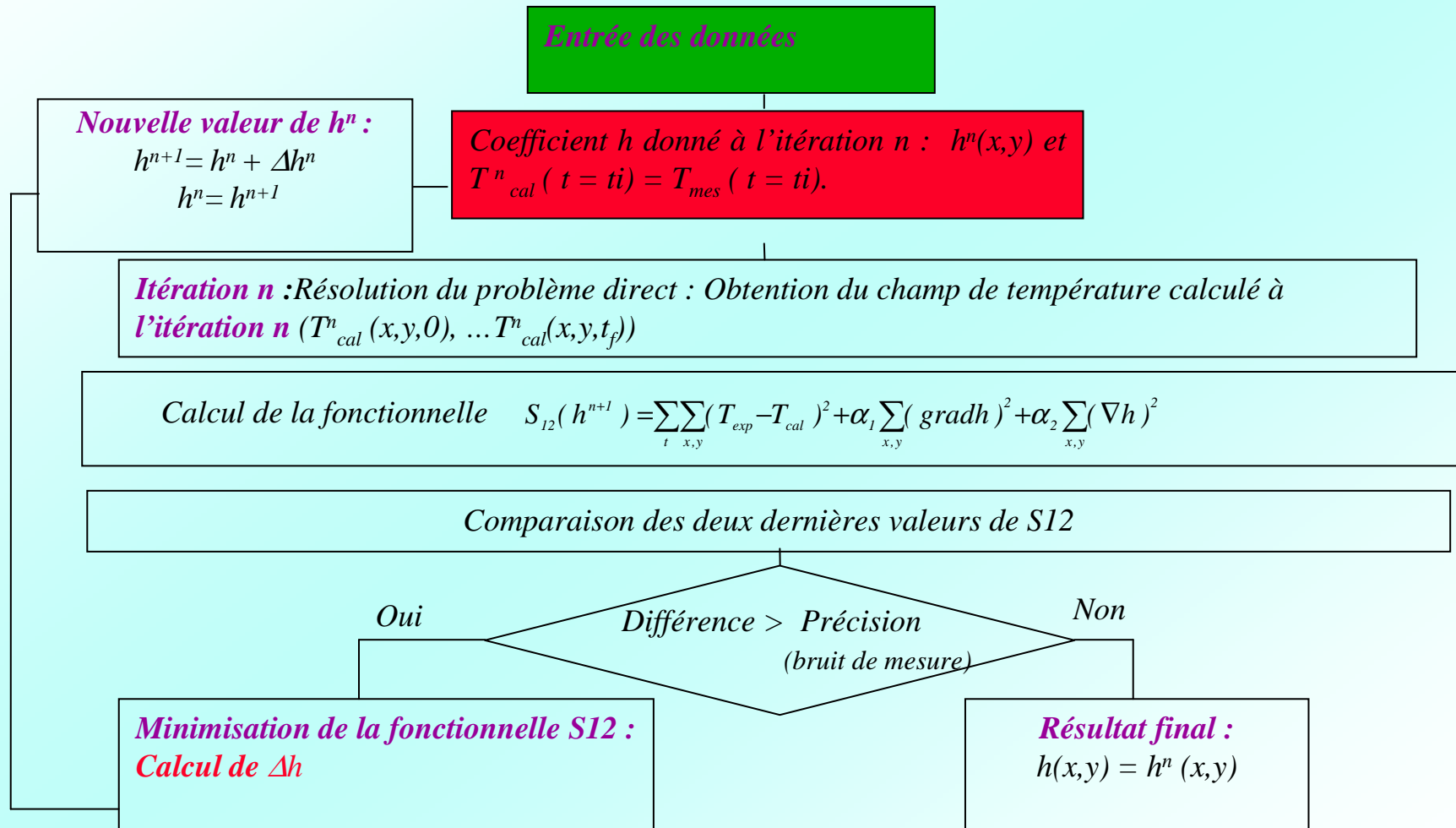
Flux imposés

Régularisation Tikhonov

$$S_{12} = \underbrace{\sum_t \sum_{x,y} [T_{cal}(x,y,t) - T_{mes}(x,y,t)]^2}_F + \alpha_1 \underbrace{\sum_{x,y} \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial y} \right)^2}_{S_1} + \alpha_2 \underbrace{\sum_{x,y} \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right)^2}_{S_2}$$



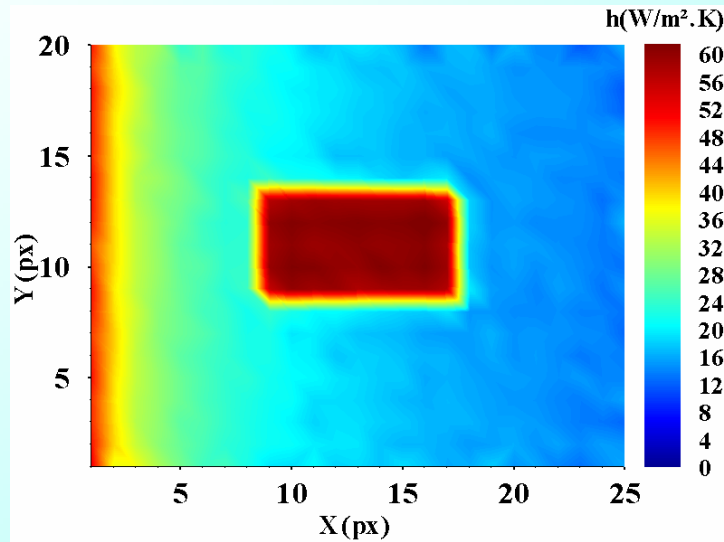
Méthode inverse : méthode de spécification de fonction



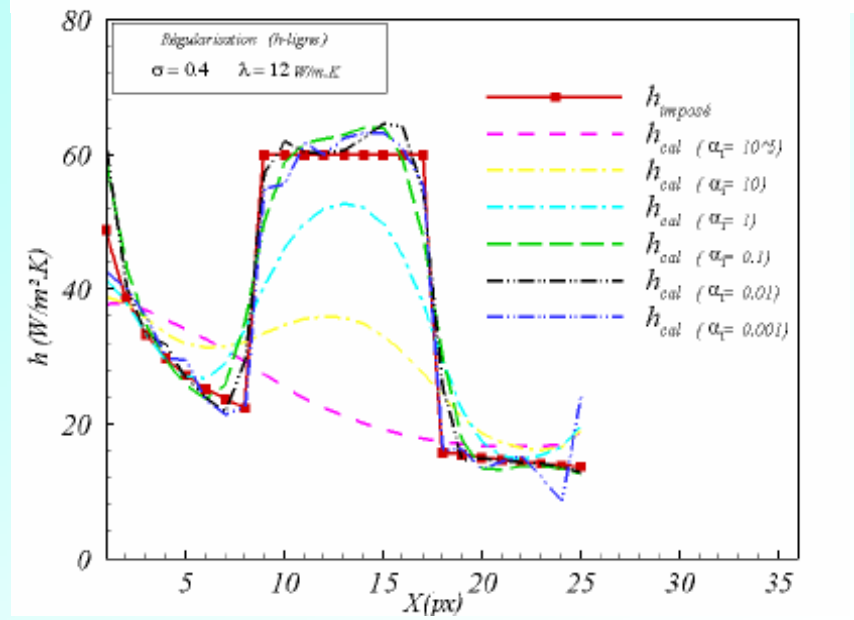
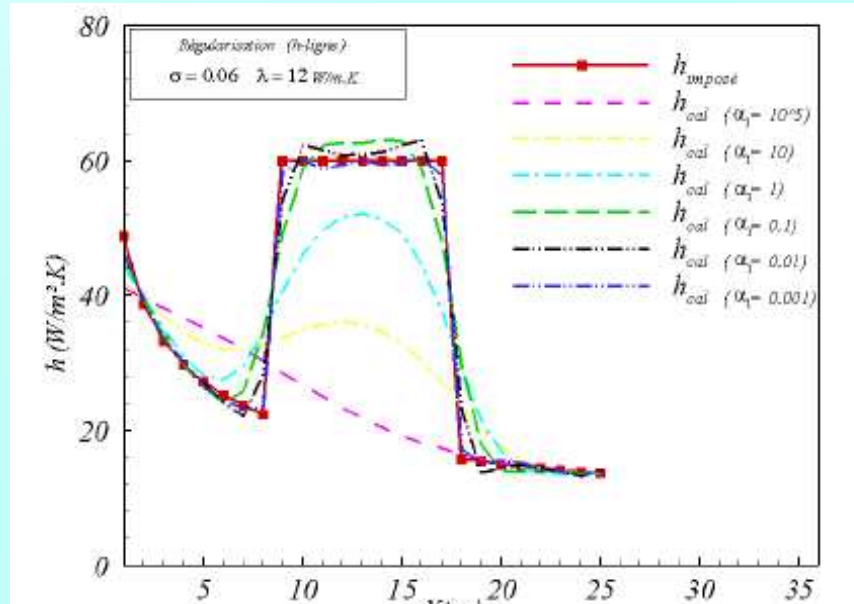
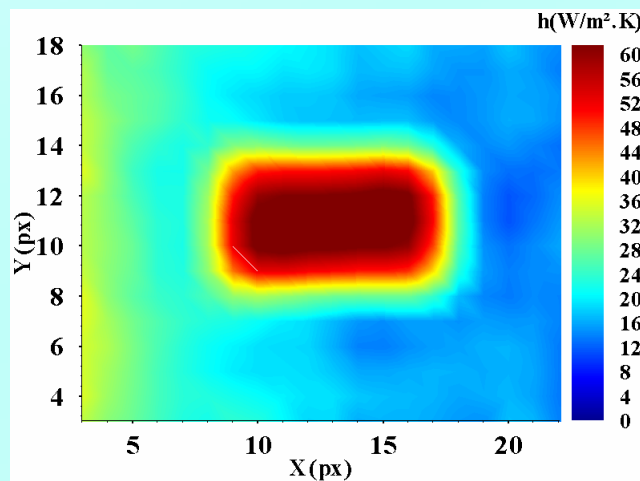
Résultats : cas test numériques



Régularisation spatio-temporelle : $\sigma = 0.06 \text{ } ^\circ\text{C}$



Régularisation spatio-temporelle : $\sigma = 0.4 \text{ } ^\circ\text{C}$



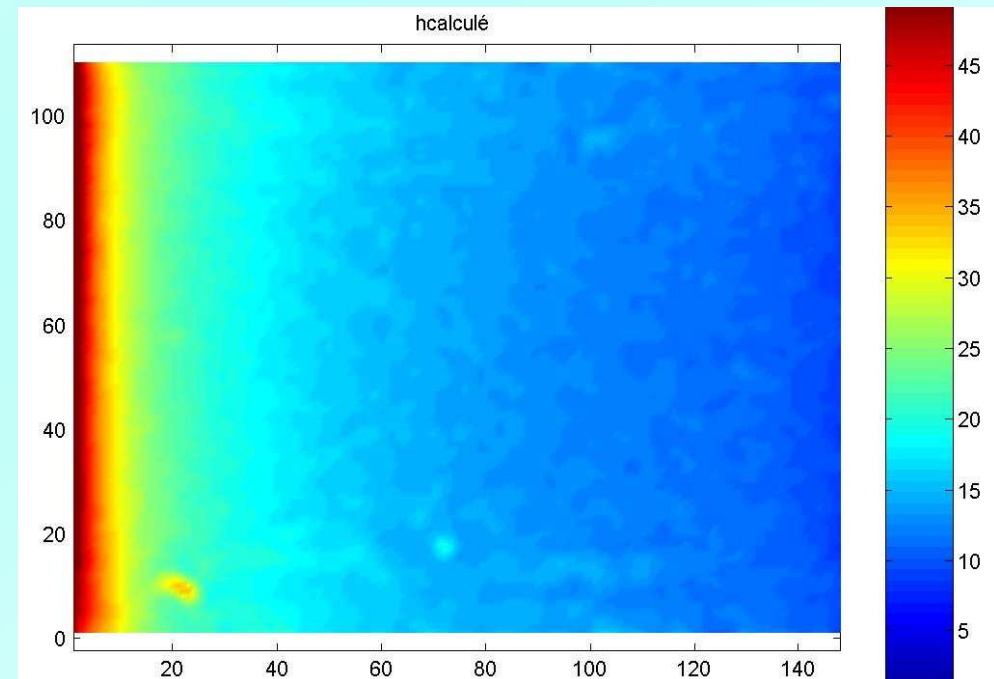
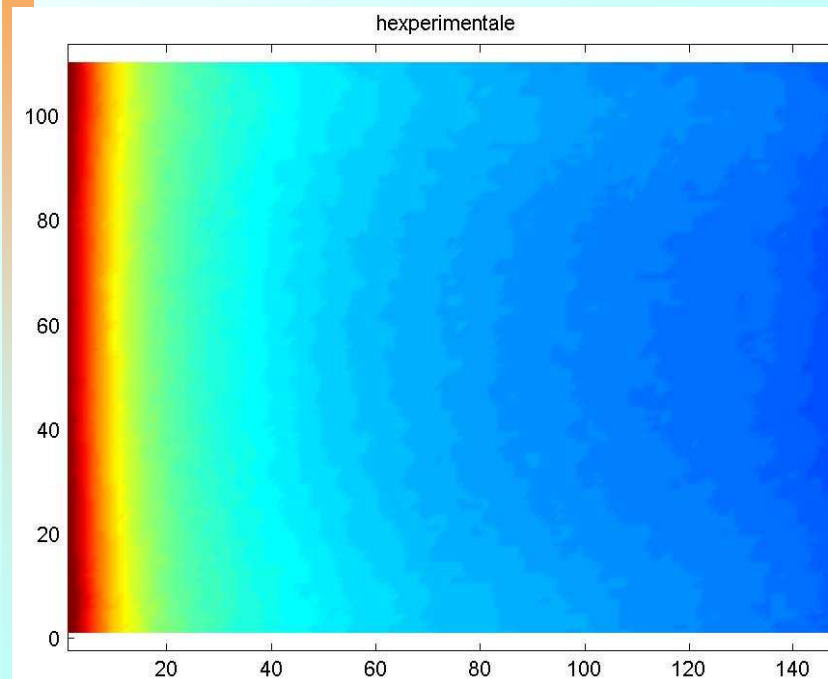
Résultats : cas expérimental



Ailette en acier inox

hcv expérimental = hlog

hcv calculé





Daniel Bougeard
bougeard@ensm-douai.fr