



$\rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} = \rho \nu \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}$
 $\frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \nabla \cdot \mathbf{v} + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right]$
 $= E_r + \sqrt{N} Q^{-1} (1 - P\alpha)$
 $= \sqrt{N} [Q^{-1} (P\alpha) + Q^{-1} (1 - P\alpha)]$
 $P = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi N}} \exp\left(-\frac{v^2}{2N}\right) dv$

ONERA

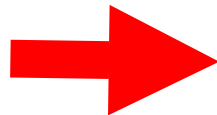
Identification des transferts de chaleur d'un impact de jet chaud supersonique par méthode inverse

P. Reulet, E. Divouron, P. Millan



Contexte industriel

- ≡ Simulation de la rupture d'une conduite d'air chaud sur avion
 - ✓ Haute pression (10 bars) : jet sous-détendu
 - ✓ Haute température (260°C)
 - ✓ Fort débit (jusqu'à 500 g/s)
- ≡ Echauffement des structures soumises à l'impact
 - ✓ Composites sensibles à la température
 - ✓ Dimensionnement de protections thermiques
- ≡ Besoin de corrélations pour le transfert de chaleur



Nu, T_{aw}

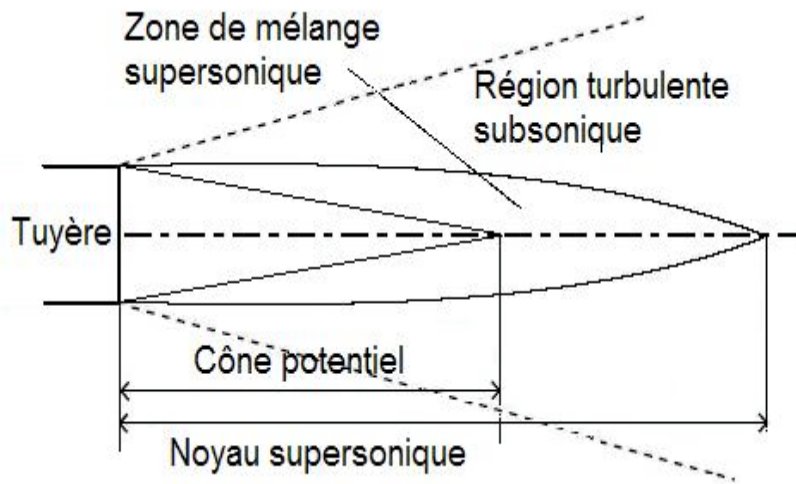
Plan

- ≡ **Synthèse bibliographique**
 - ✓ Jets sous-détendus
 - ✓ Transferts de chaleur à l'impact de jet
- ≡ **Méthode expérimentale**
 - ✓ Montage banc d'essais
 - ✓ Méthode d'identification
- ≡ **Résultats**
 - ✓ Effet de la distance jet - paroi
 - ✓ Effet de la courbure de la paroi d'impact

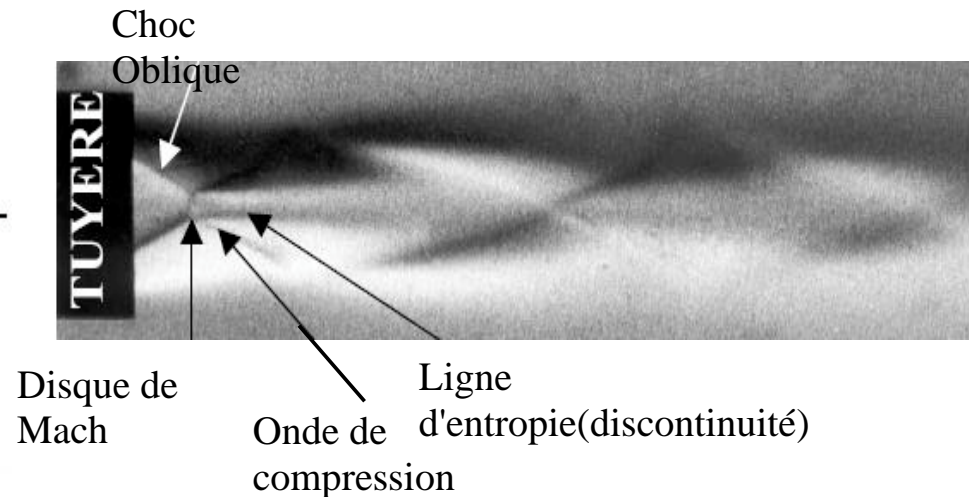
Synthèse bibliographique

≡ Jet libre supersonique : chocs, ondes de détente, zones de mélange

Schéma d'un jet parfaitement détendu



Visualisation d'un jet sous détendu par strioscopie



Synthèse bibliographique

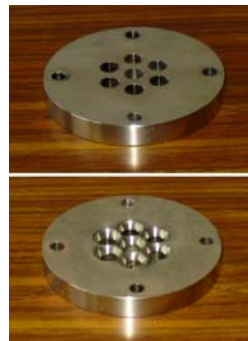
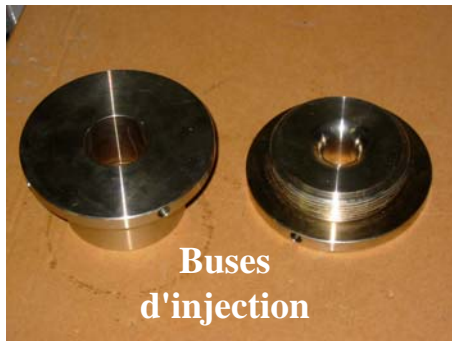
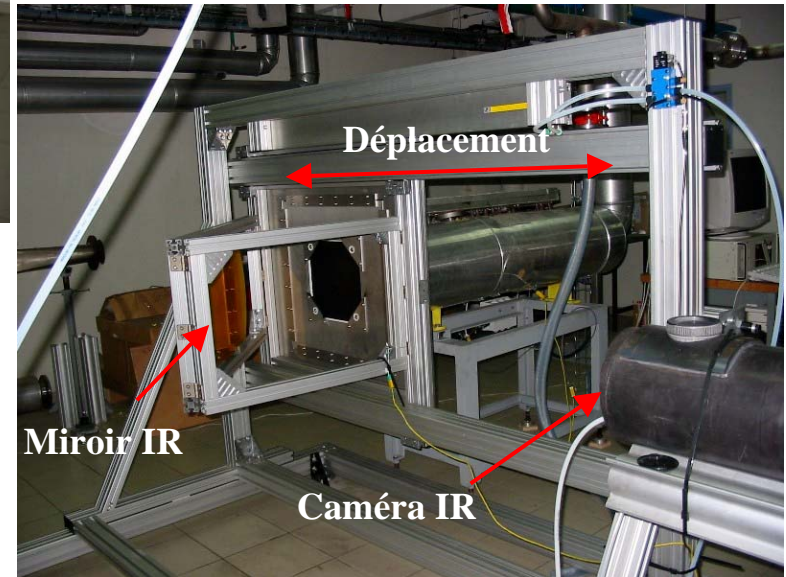
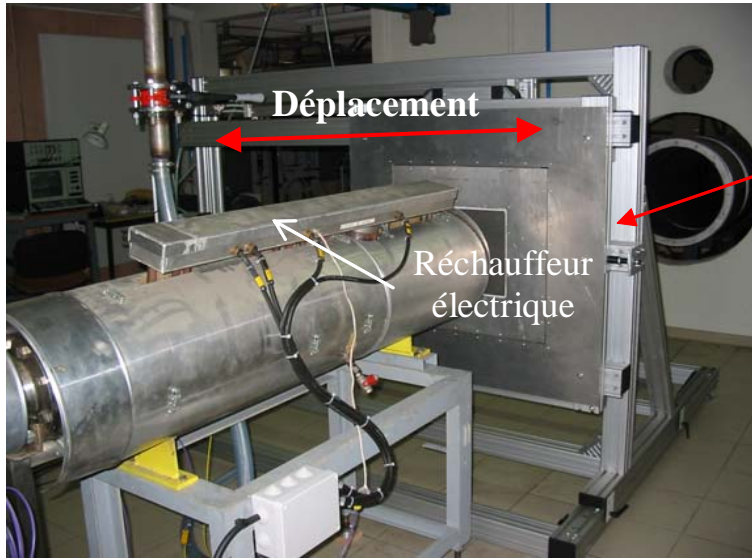
- ≡ **Impact** : point d'arrêt, développement d'un jet radial, phénomène de recirculation
- ≡ Mécanismes du transfert thermique : convection forcée
 - √ Grandeurs caractéristiques
 - Température adiabatique de paroi : T_{AW}
 - Coefficient d'échange convectif : h_{CV}
 - Nombre de Nusselt : Nu_d
 - √ Paramètres influents
 - Diamètre de la buse d
 - Distance buse-paroi adimensionnée H/d
 - Courbure de la paroi d'impact
 - Nombre de Reynolds Re_d

Plan

- ≡ Synthèse bibliographique
 - ✓ Jets sous-détendus
 - ✓ Transferts de chaleur à l'impact de jet
- ≡ **Méthode expérimentale**
 - ✓ Montage banc d'essais
 - ✓ Méthode d'identification
- ≡ Résultats
 - ✓ Effet de la distance jet - paroi
 - ✓ Effet de la courbure de la paroi d'impact

Montage banc d'essais

Arrivée
air chaud →



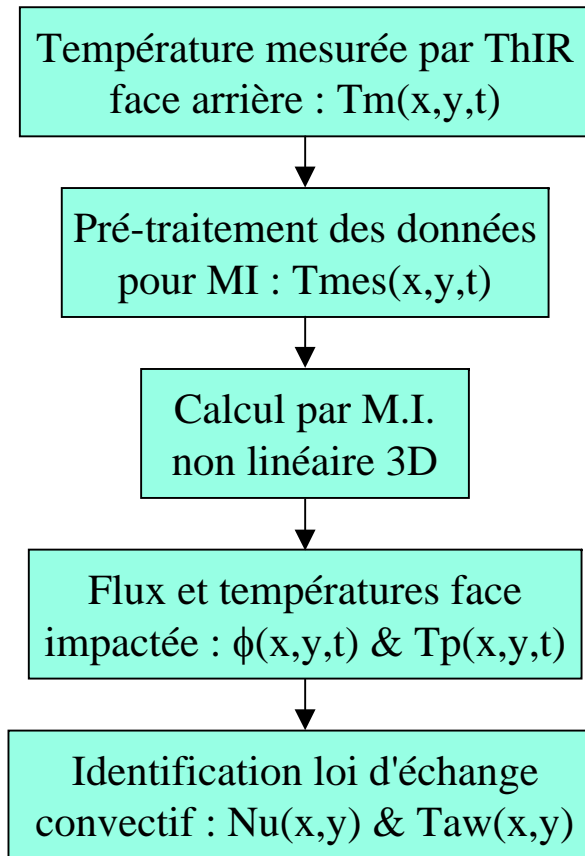
Montage banc d'essais

≡ Moyens de mesure

- ✓ Thermographie infrarouge
 - Caméra CEDIP JADE LWIR
 - Résolution spatiale 6 mm (à 2,60 m)
- ✓ Vélocimétrie Laser (non présenté)
 - Chaîne TSI
 - Post-traitement des données ASSA
- ✓ Contrôle des températures d'ambiance et des conditions de jet
 - Chaîne d'acquisition NI

Méthode d'identification

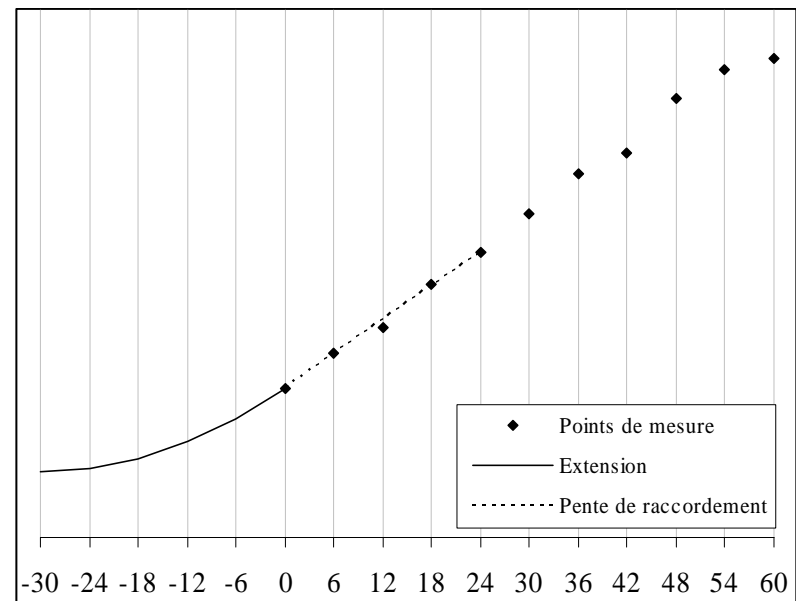
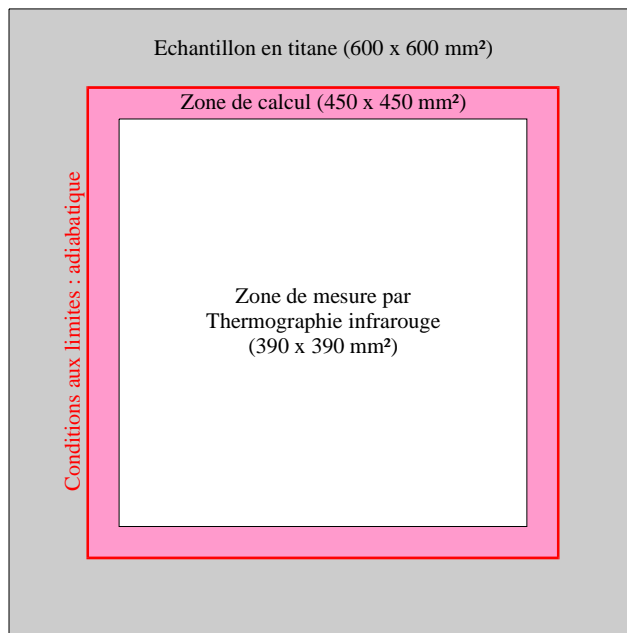
≡ Principe



Méthode d'identification

≡ Pré-traitement des données

- ✓ Extension de la zone de mesure pour C.L. adiabatiques
- ✓ Prise en compte du temps de conduction (essai < 1 min.)



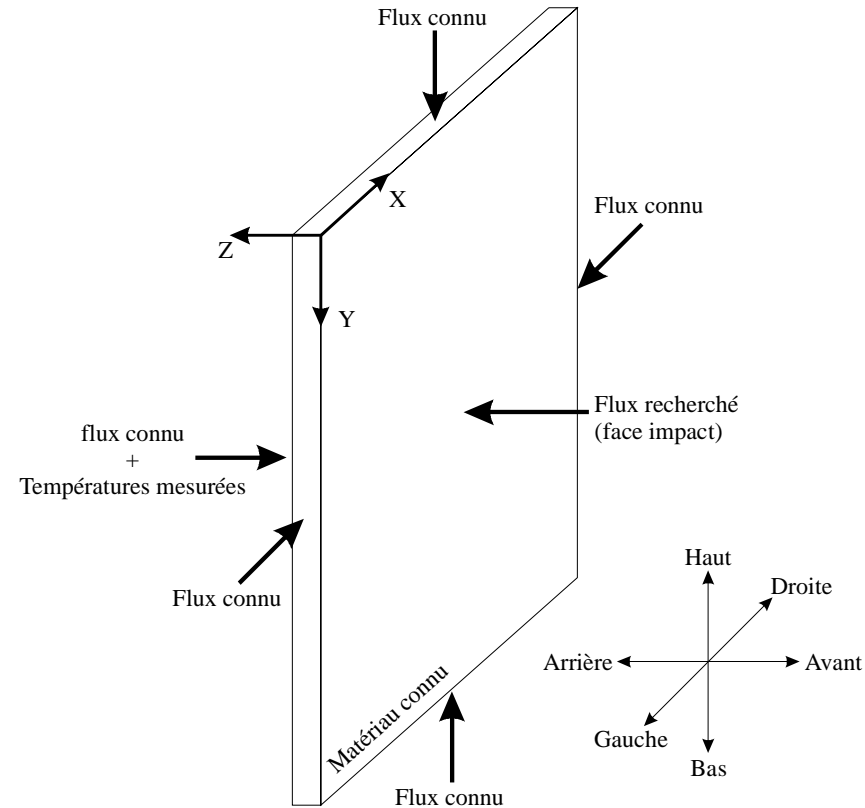
Méthode d'identification

≡ Méthode inverse non linéaire 3D de conduction (PICC)

- ✓ Géométrie plaque plane/courbe d'épaisseur constante
- ✓ Bords adiabatiques
- ✓ Loi d'échange convecto-radiatif en face arrière

$$\varphi_{Ar} = h(T_{mes} - T_{amb}) + \varepsilon\sigma(T_{mes}^4 - T_{ray}^4)$$

- ✓ Equation d'observation = mesures de température en face arrière



Méthode d'identification

≡ Méthode de résolution du PICC : séquentielle de Beck

- ✓ Minimisation de la fonctionnelle R

$$R = \sum_{k=1}^r \sum_{(i,j)=1}^{Nmes} \left(Y_{i,j}^{n+k} - T_{i,j}^{n+k} \left([q^n + \Delta q^{n+1}] \right) \right)^2$$

- ✓ Résolution d'un système matriciel basé sur le calcul des sensibilités

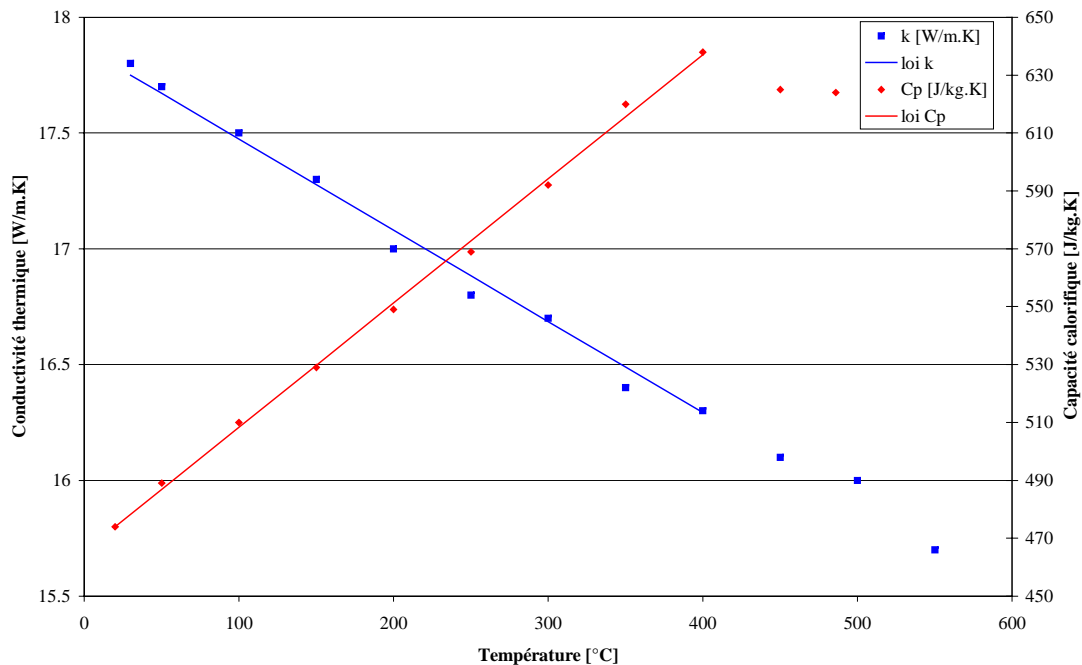
$$[\Delta q^{n+1}] = [S^n]^{-1} [D^n]$$

- ✓ Utilisation de la TCD : régularisation et réduction du nombre d'inconnues recherchées

- Choix des composantes principales de la carte $[\Delta q^{n+1}]$

Méthode d'identification

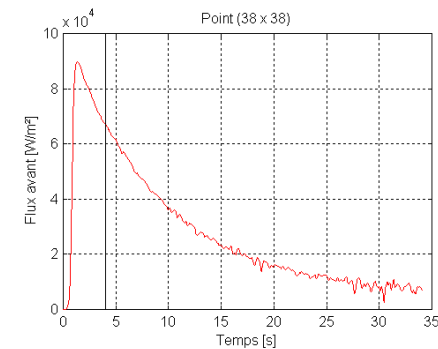
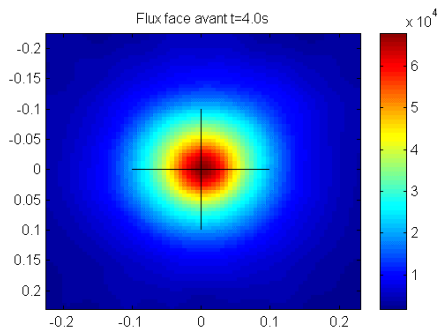
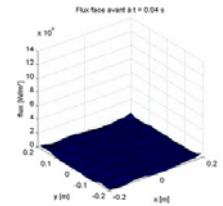
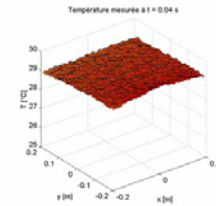
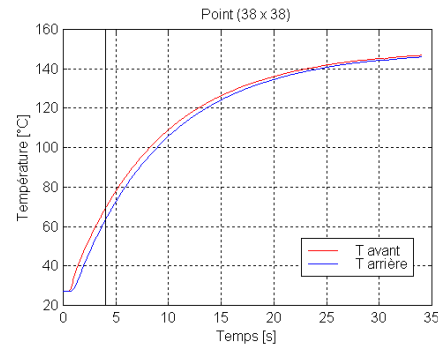
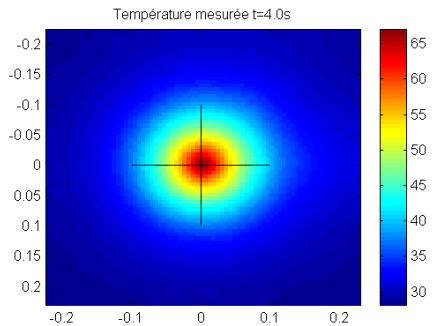
- ≡ Plaque d'impact : Titane T40, épaisseur 5 mm
- ≡ Propriétés thermophysiques



$$\begin{cases} k = 17,87 + 3,94 \times 10^{-3} \cdot T \text{ [W/m.K]} \\ C_p = 465,4 + 0,4291 \cdot T \text{ [J/kg.K]} \\ \rho = 4507 \text{ [kg/m}^3\text{]} \end{cases}$$

Méthode d'identification

- ≡ Exemple de résultat : température & flux, face impactée
 - ✓ D=22 mm, H/d=12, qm=126 g/s (sortie sonique)

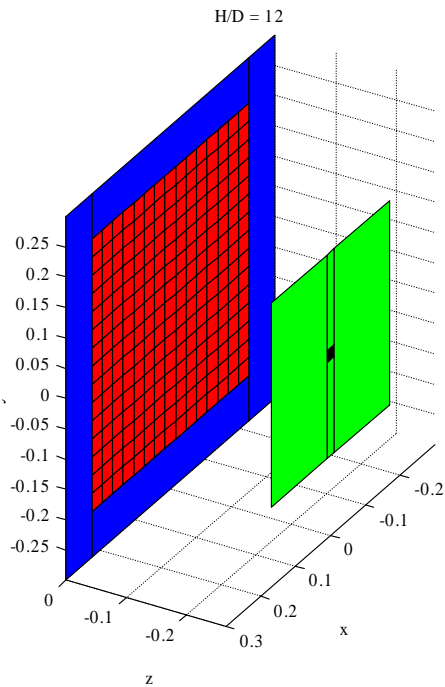


Flux calculé par M.I.

$$\varphi_{total} = h \cdot (T_{aw} - T_P) + \varphi_{ray}$$

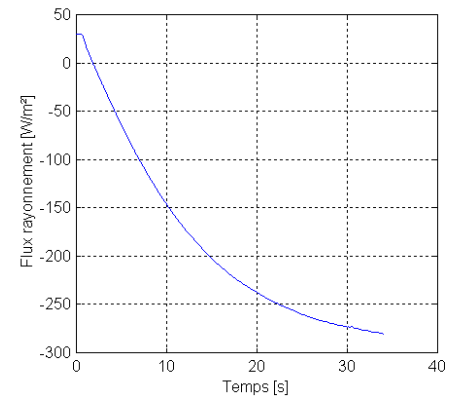
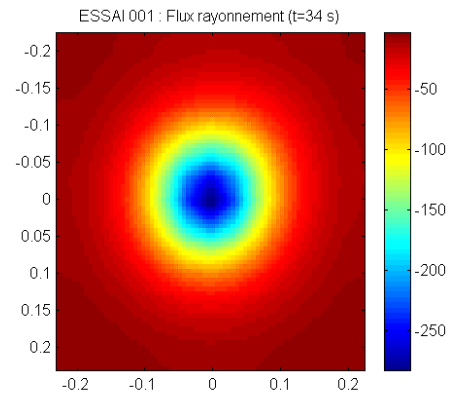
Méthode d'identification

≡ Correction de rayonnement face avant



Géométrie simplifiée
plaque - injecteur

Terme de rayonnement dans le flux total

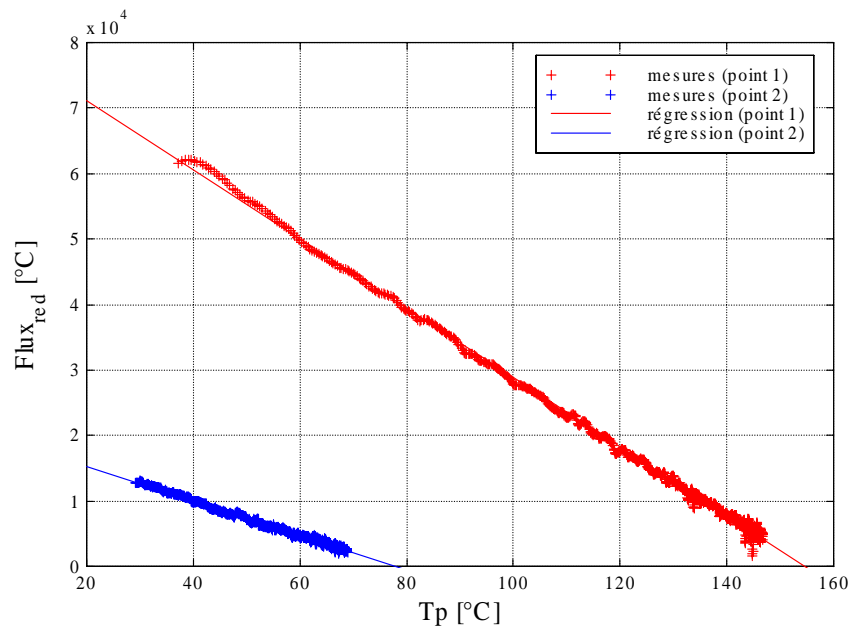


Méthode d'identification

≡ Identification de la loi de convection :

$$\varphi_{cv} = h_{cv} \cdot (T_{aw} - T_P) \quad \text{avec} \quad h_{cv} = \frac{Nu_D \cdot \lambda(T_f)}{D} \quad \text{où} \quad T_f = \frac{T_P + T_{aw}}{2}$$

≡ Loi linéaire : $\varphi_{red}(x, y, t) = \frac{D \cdot \varphi_{cv}(x, y, t)}{\lambda(T_f(x, y, t))} = Nu_D(x, y) \cdot (T_{aw}(x, y) - T_P(x, y, t))$



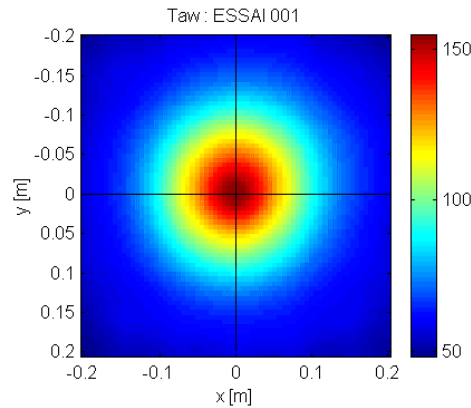
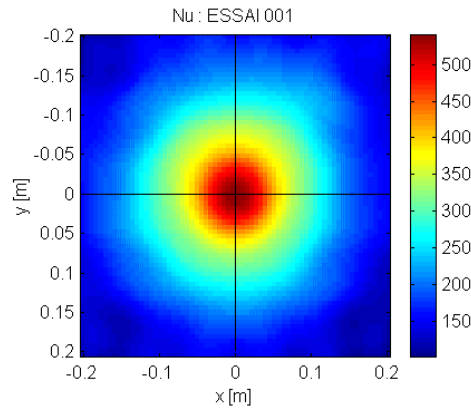
Cartographies

$Nu_D(x, y)$

$T_{aw}(x, y)$

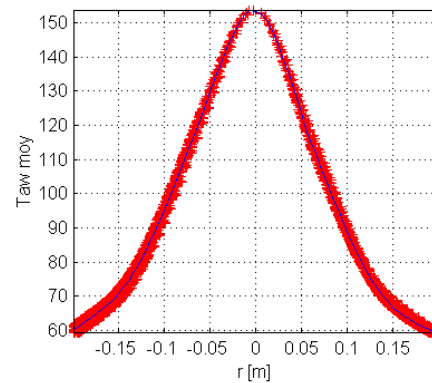
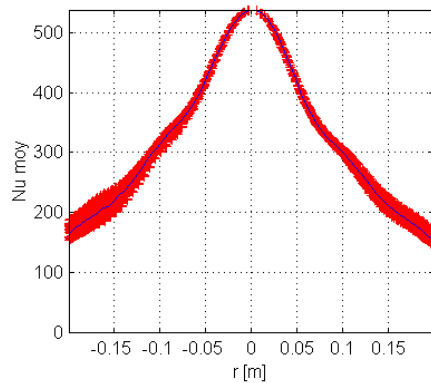
ONERA

Méthode d'identification



≡ Pour les cas axisymétriques :
extraction d'un profil radial moyen

- ∨ $Nu_d(r)$
- ∨ $T_{aw}(r)$



Plan

≡ Synthèse bibliographique

- ✓ Jets sous-détendus
- ✓ Transferts de chaleur à l'impact de jet

≡ Méthode expérimentale

- ✓ Montage banc d'essais
- ✓ Méthode d'identification

≡ Résultats

- ✓ Effet de la distance jet - paroi
- ✓ Effet de la courbure de la paroi d'impact

Résultats des essais

≡ Paramètres explorés

- ✓ Débit du jet : 70 à 550 g/s
- ✓ Diamètre de buse : 22, 32, 40 mm
- ✓ Distance buse – paroi : $H/D = 2$ à 20
- ✓ Angle d'impact : 0° , 30° , 45° , 60° (p/r à la normale)
- ✓ Courbure de la paroi d'impact : $R_c = \text{inf.}$, 400 mm, 100 mm

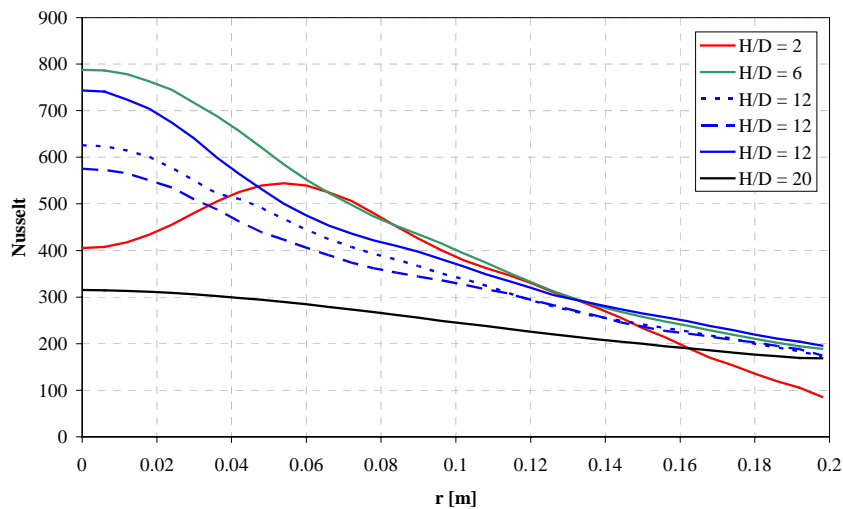
- ✓ Matériau de la paroi d'impact : T40 - composite

Résultats

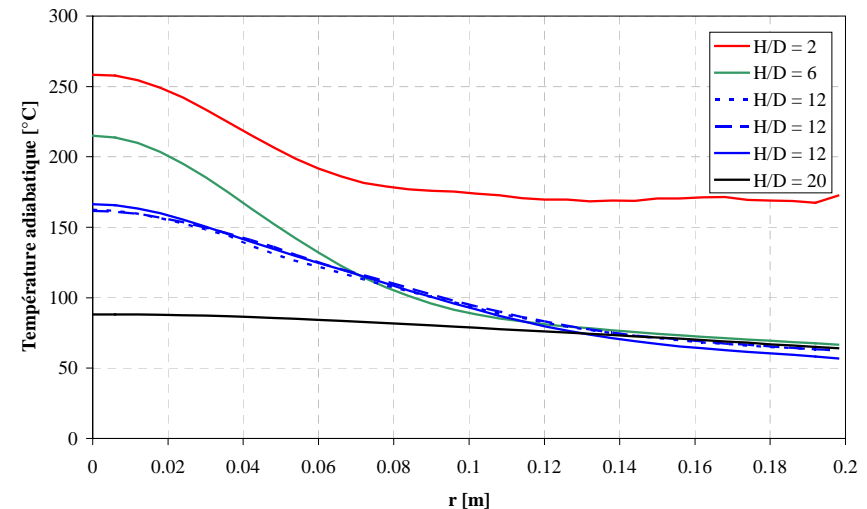
≡ Effet de la distance buse - paroi d'impact

∨ $q_m = 166 \text{ g/s}$ – $d = 22 \text{ mm}$ – plaque plane

Nombre de Nusselt



Température adiabatique

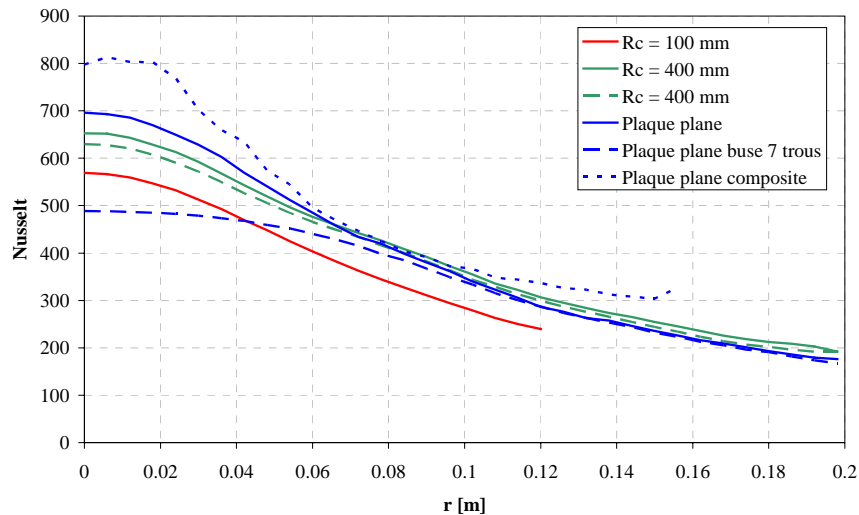


≡ Phénomènes d'intermittence des conditions d'injection

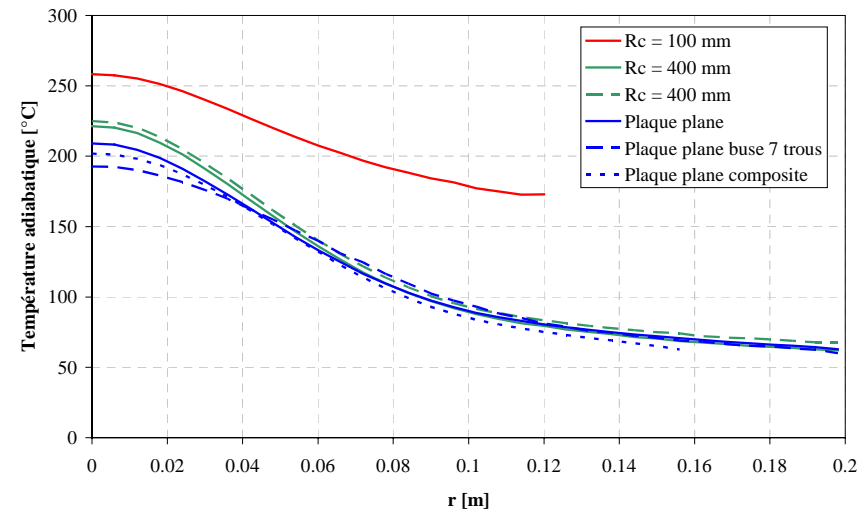
Résultats

- ≡ Effet de la courbure de la paroi d'impact
 - ∨ $q_m=126 \text{ g/s}$ – $d=22 \text{ mm}$ – $H/D=6$
- ≡ Comparaison buse 1 trou / buse 7 trous à surface équivalente
- ≡ Vérification sur plaque composite

Nombre de Nusselt



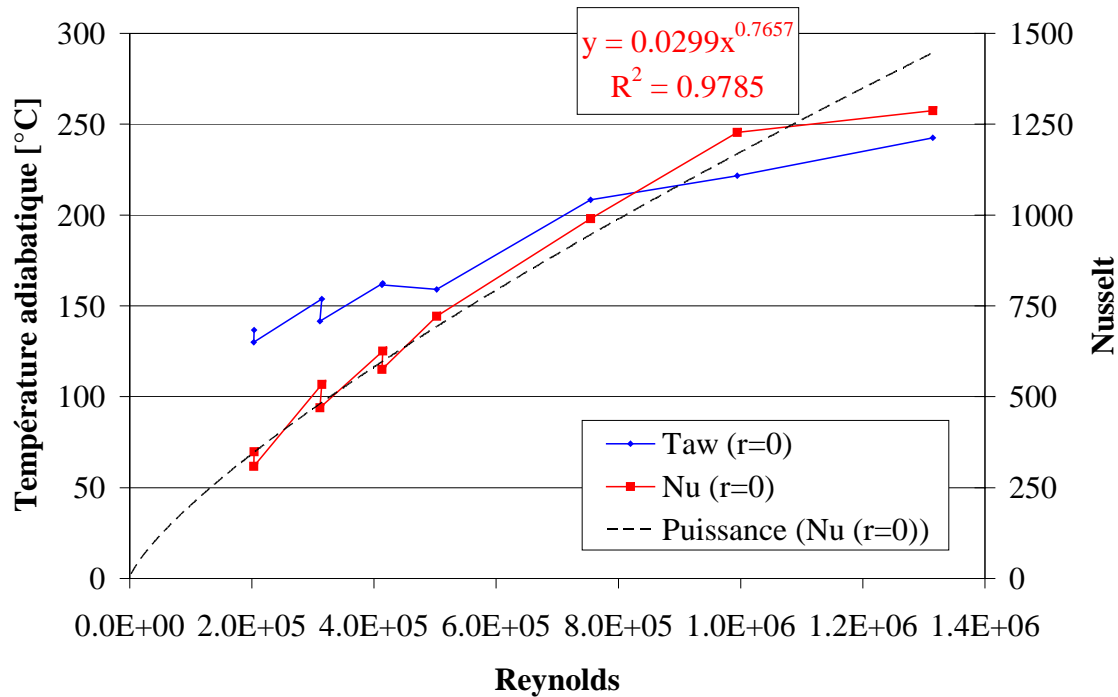
Température adiabatique



Résultats

≡ Effet du débit du jet : point d'impact

∨ d=22 mm – H/D=6



Corrélation au point d'impact :

$$Nu_d = 0.03 \cdot Re_d^{0.77}$$

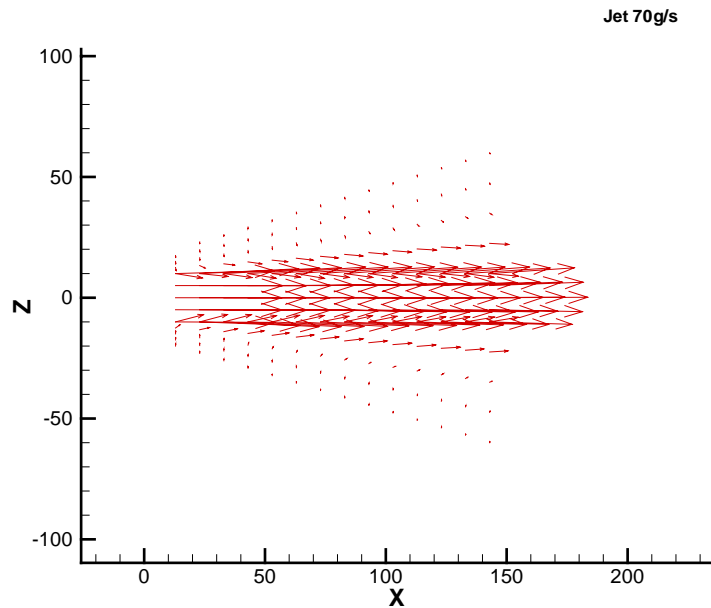
Conclusion

- ≡ Développement d'une méthode d'identification des cartographies du Nombre de Nusselt et de la température adiabatique de paroi
 - ✓ Méthode inverse de conduction
 - ✓ Mesures par thermographie infrarouge
 - ✓ Identification des cartographies par régression linéaire
- ≡ Analyse des transferts de chaleur à l'impact d'un jet chaud sous-détendu
 - ✓ Influence de nombreux paramètres
 - ✓ Détermination de corrélations
- ≡ Application à une plaque composite

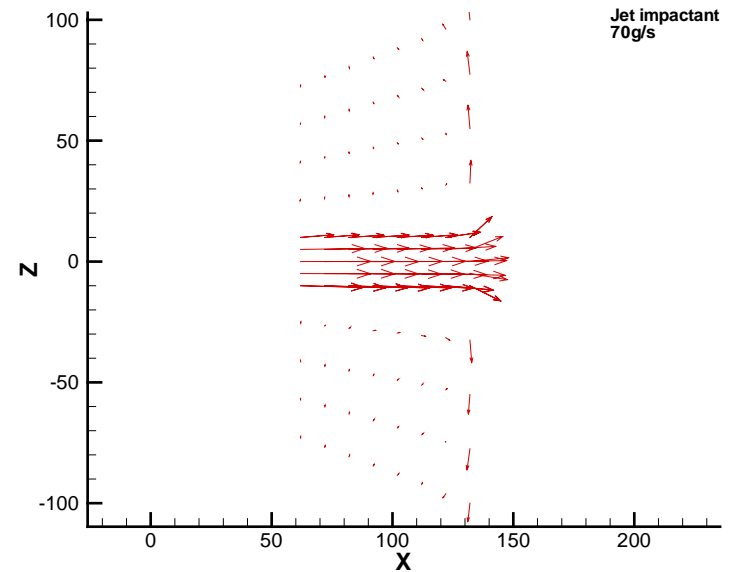
Caractérisation dynamique

≡ Jet subsonique : $q_m=70$ g/s

Jet libre



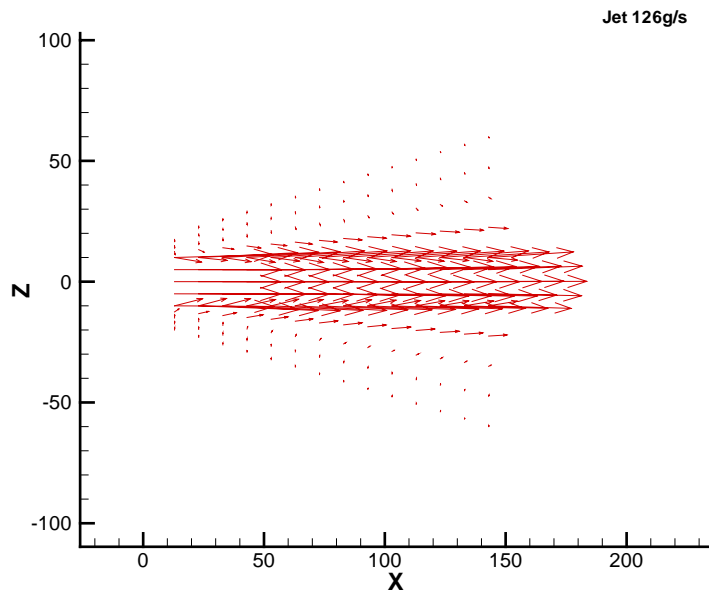
Jet impactant



Caractérisation dynamique

≡ Jet subsonique : $q_m = 126 \text{ g/s}$

Jet libre



Jet impactant

