



**Résolution de problèmes inverses
instationnaires de conduction de la chaleur
à partir d'observations
par thermographie infrarouge**

Philippe REULET, Pierre MILLAN
ONERA / DMAE / C2A

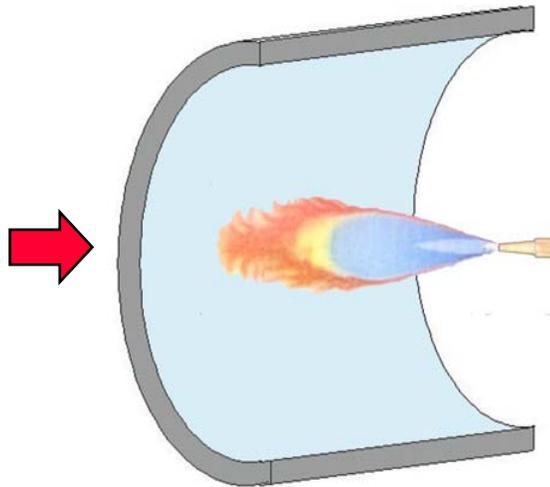


r e t o u r s u r i n n o v a t i o n

Objectifs

- Estimation de cartographies de flux et températures instationnaires dans des environnements agressifs ou inaccessibles

Mesures de températures par thermographie infrarouge en face arrière



Méthode Inverse

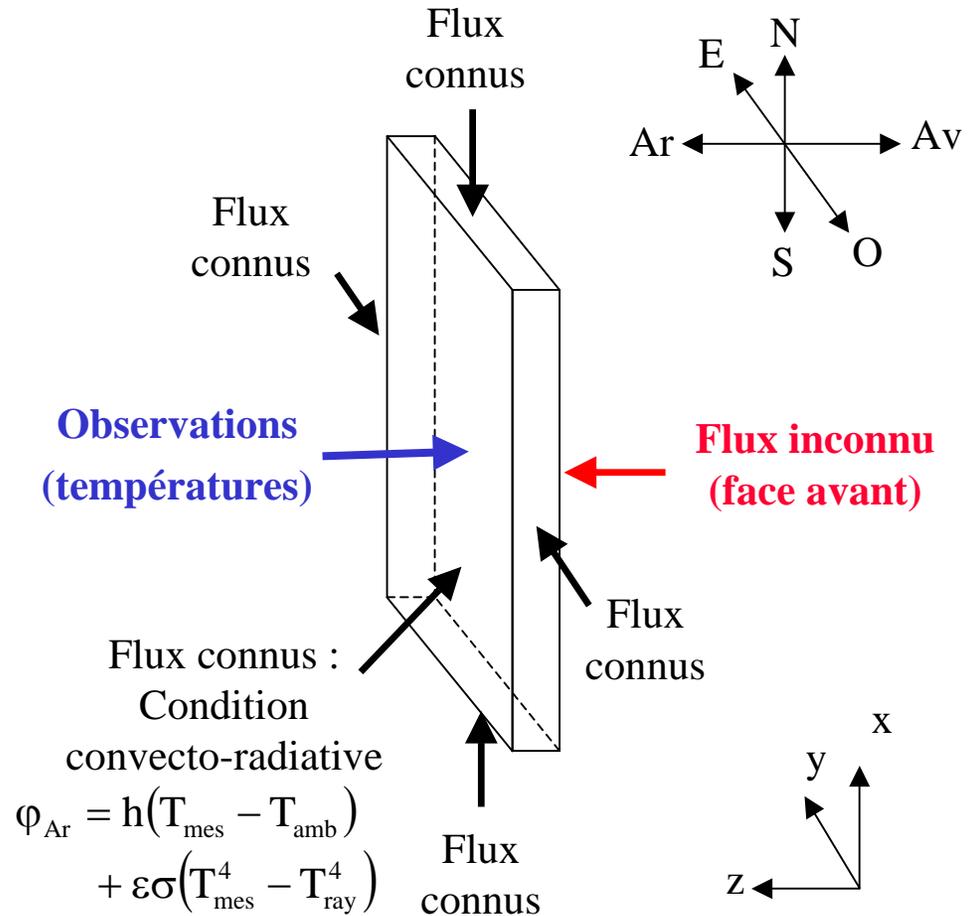
Estimation des températures et flux de chaleur à la paroi en régime instationnaire

Plan de l'exposé

- **Méthode inverse d'identification**
- Essais d'impact de jet chaud supersonique
- Essais d'impact de flamme
- Essais en soufflerie hypersonique
- **Conclusions - Perspectives**

Méthode inverse d'identification - Configuration

- Développement d'un modèle inverse de conduction de la chaleur
 - **3D instationnaire**
 - Propriétés thermophysiques variables : **Non Linéaire**
 - **Résolution spatiale élevée**
 - Plaque d'épaisseur constante plane ou courbe

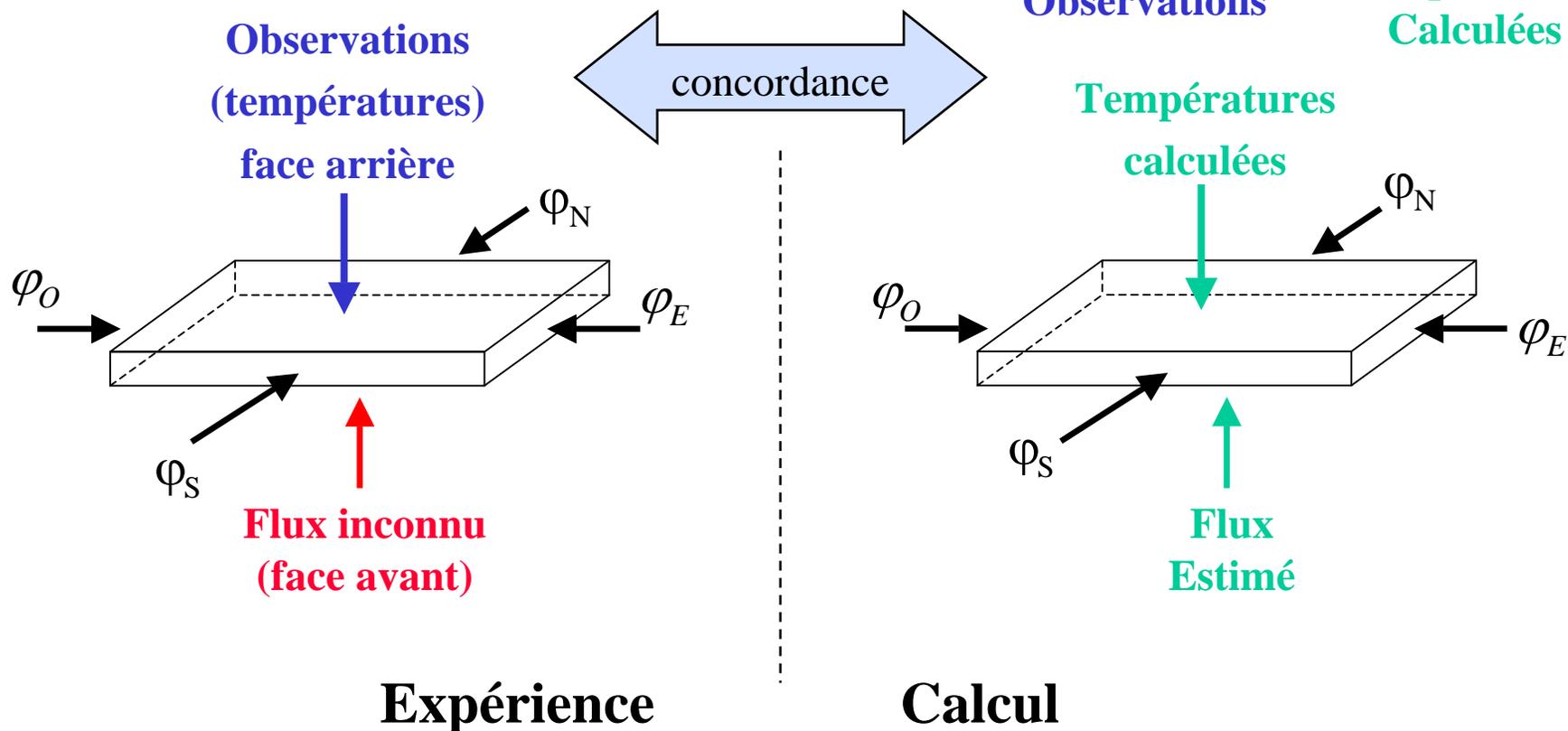


Méthode inverse d'identification - Principe

- Minimisation d'une fonctionnelle

$$R = \sum_{n=1}^{N_t} \sum_{i=1}^{N_{mes}} \left(Y_i^n - T_i^n(\vec{q}) \right)^2$$

Observations Inconnues
Températures Calculées



Méthode inverse d'identification - Principe

- **Méthode séquentielle de Beck**
 - r pas de temps futurs
 - coefficients de sensibilité
 - inversion d'un système matriciel
- **Problème inverse non linéaire**
 - coefficients de sensibilité variables
 - inversion du système à chaque pas de temps
- **Utilisation de la T.C.D. (Transformée en Cosinus Discrète)**
 - méthode de régularisation / filtrage des données d'entrée
 - méthode de réduction du nombre d'inconnues à identifier
 - cartographie de flux recherchée dans une base de cosinus

Méthode inverse d'identification - Résolution

- Fonctionnelle minimisée

r : nombre de pas de temps futurs

$$R^{n+1} = \sum_{k=1}^r \sum_{i=1}^{N_{mes}} \left(Y_i^{n+k} - T_i^{n+k}(\vec{p}^{n+1}) \right)^2$$

T.C.D. de la carte de flux
au temps $n+1$
de taille $\ll N_x * N_y$

- Minimisation par la méthode de Beck

$$\begin{bmatrix} \Delta p_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta p_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S'_{11} & \cdot & \cdot & S'_{1m} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ S'_{m1} & \cdot & \cdot & S'_{mm} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} D_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ D_m \end{bmatrix} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} S'_{lh} = \sum_{i=1}^{N_{mes}} \sum_{j=1}^r \left(S_{T_i, p_l^{n+1}}^{n+j} \cdot S_{T_i, p_h^{n+1}}^{n+j} \right) \\ D_l = \sum_{i=1}^{N_{mes}} \sum_{j=1}^r \left(Y_i^{n+j} - T_i^{n+j}(\vec{p}^n) \right) \cdot S_{T_i, p_l^{n+1}}^{n+j} \end{cases}$$

Méthode inverse d'identification - Filtrage par T.C.D.

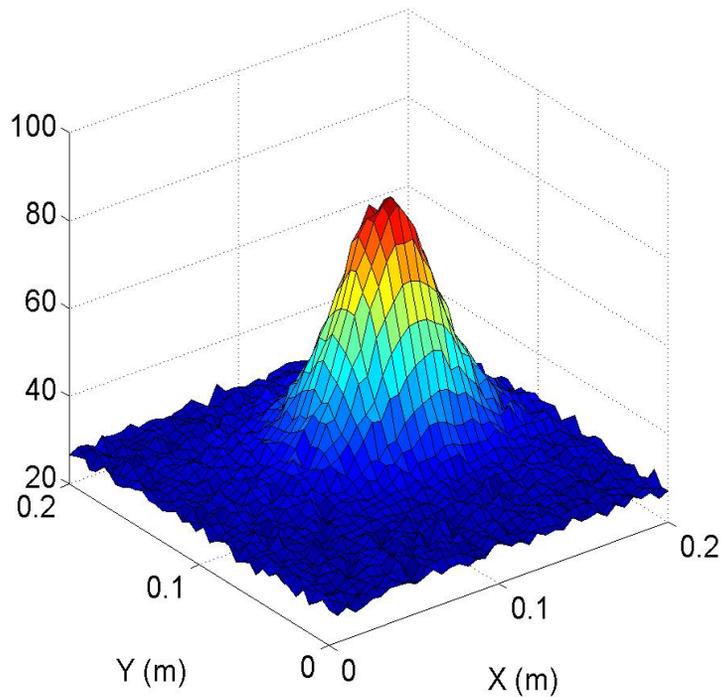
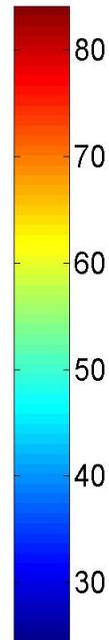
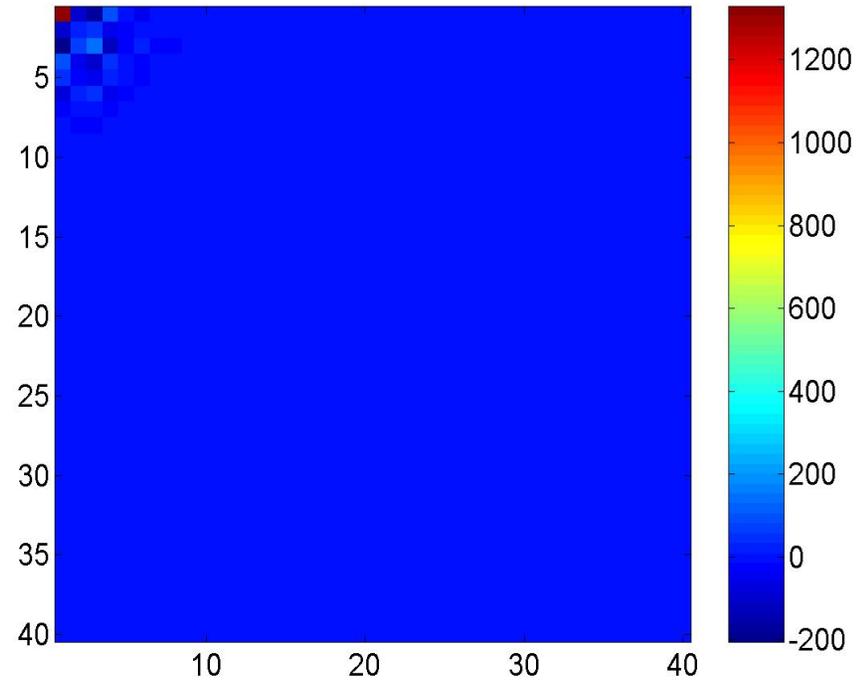


Image Originale (carte de températures mesurée)

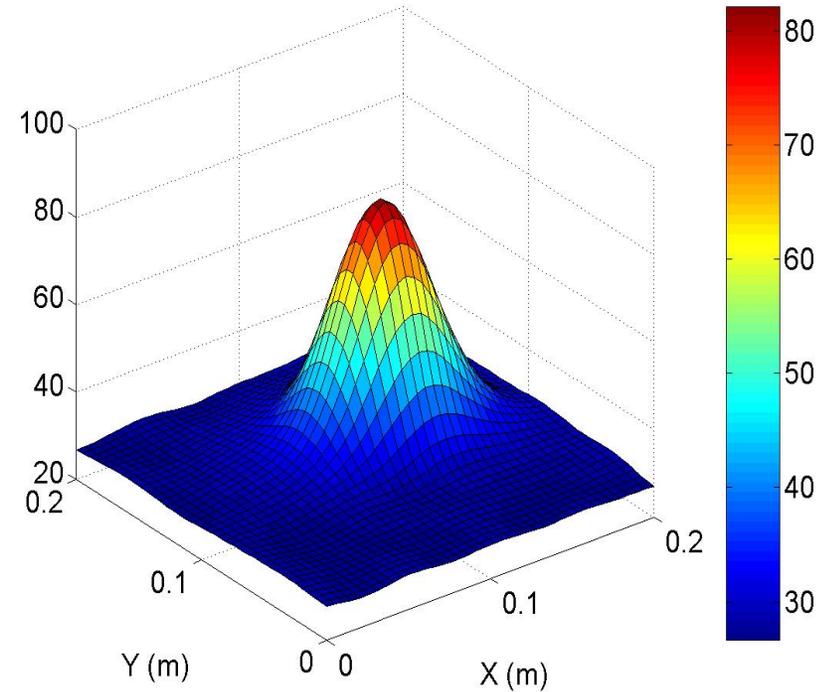
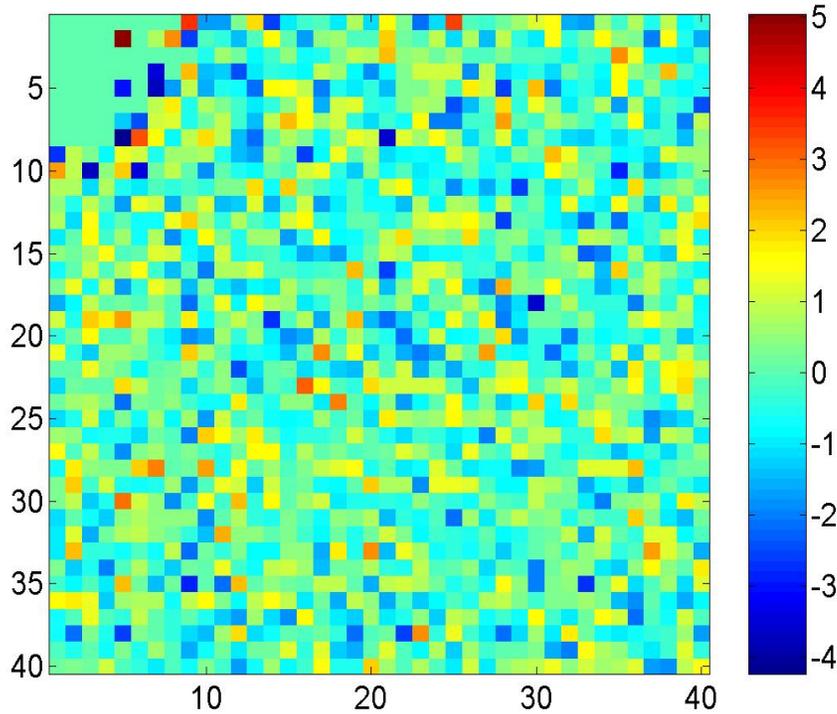


Compactage de l'énergie



T.C.D. de la carte de températures

Méthode inverse d'identification - Filtrage par T.C.D.



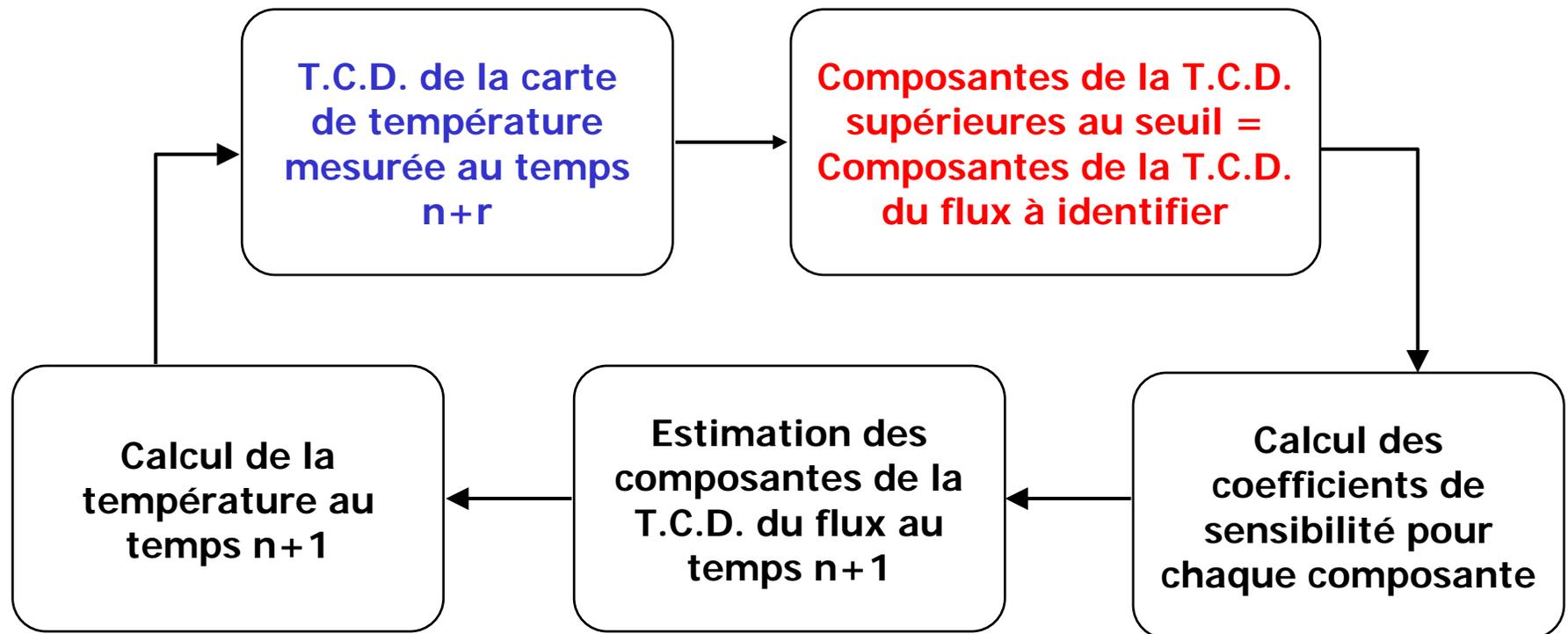
Termes inférieurs au seuil SURE

T.C.D. inverse : carte de températures filtrée

$$t = \sigma \sqrt{2 \ln((N_x \cdot N_y) \log_2(N_x \cdot N_y))} \longrightarrow \text{Composantes annulées}$$

Méthode inverse d'identification - Algorithme

- A chaque pas de temps



Méthode inverse d'identification

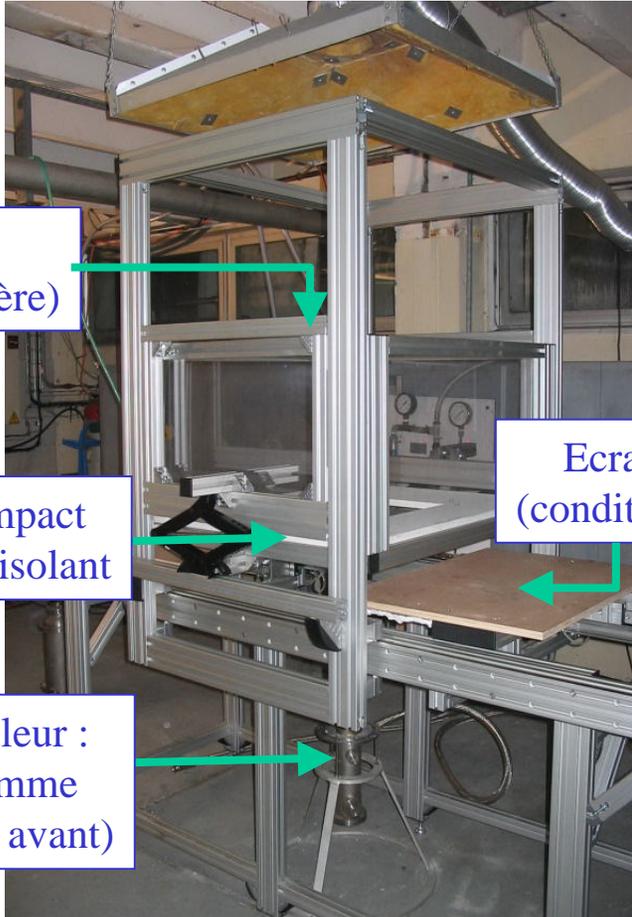
- Validation
 - numérique (sans / avec bruit de mesure simulé)
 - expérimentale (impact d'un faisceau laser en mouvement)
- Applications
 - impact de jets chauds supersoniques sur paroi
 - impact de flamme sur paroi
 - maquette en écoulement hypersonique

Plan de l'exposé

- Méthode inverse d'identification
- Essais d'impact de jet chaud supersonique
- **Essais d'impact de flamme**
- Essais en soufflerie hypersonique
- Conclusions - Perspectives

Essais d'impact de flamme

Banc en configuration d'impact



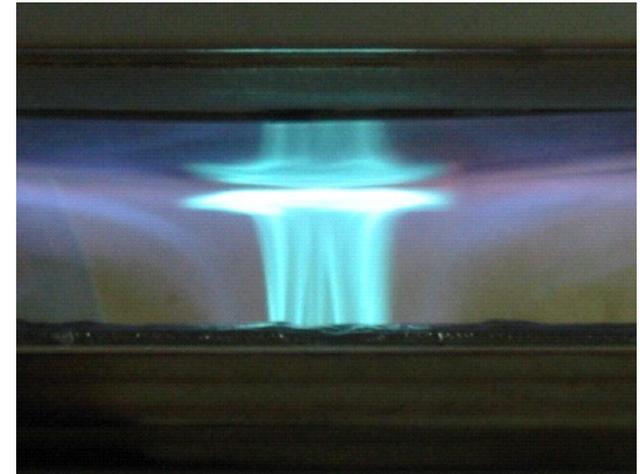
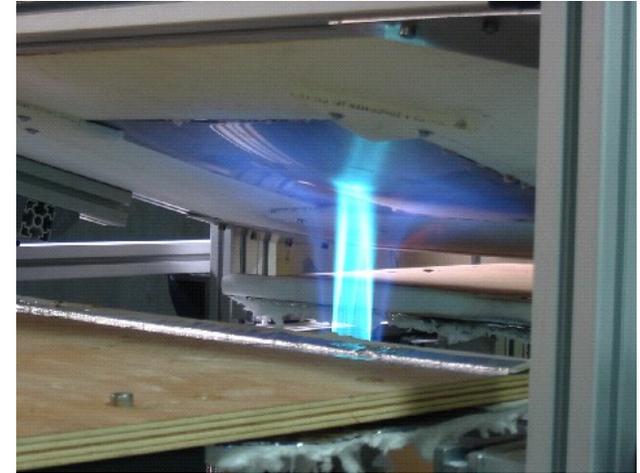
ThIR
(face arrière)

Paroi d'impact
& support isolant

Brûleur :
flamme
(face avant)

Ecran isolant
(condition initiale)

Flamme prémélangée propane - air

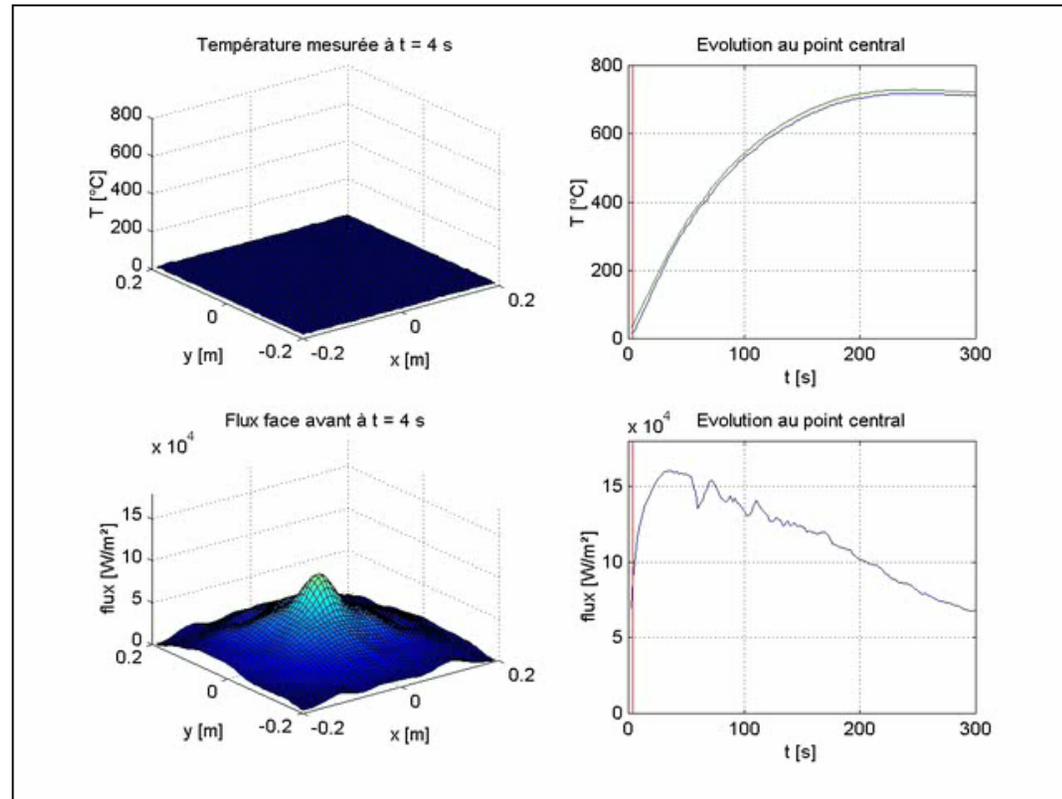


- Paramètres explorés
 - épaisseur de la plaque
 - distance H/D
 - angle d'inclinaison de la plaque
 - débit et richesse de la flamme
- Modèle de flux à la paroi
 - effet de la peinture haute émissivité en face avant
 - séparation convection / rayonnement

Essais d'impact de flamme

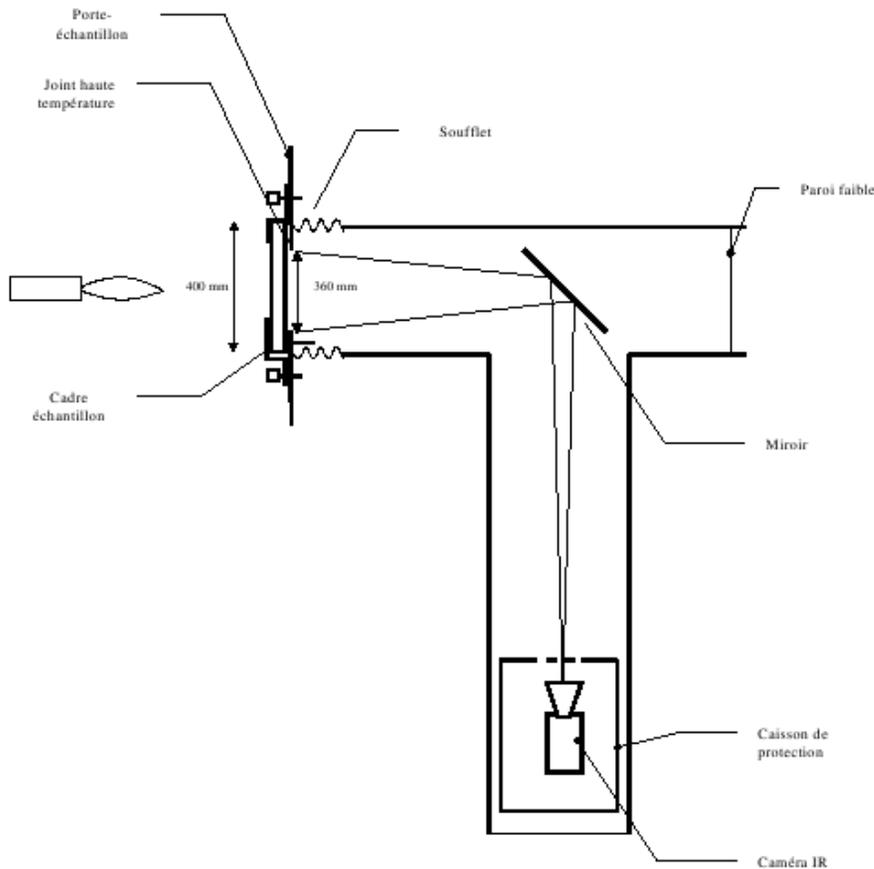
- Exemple de résultat d'identification
 - flamme :
 - richesse=1.10
 - débit = 5.8 g/s
 - distance :
 - H/D = 2.5
 - plaque :
 - acier inox
 - épaisseur 5 mm

ESSAI 014



Essais d'impact de flamme torche (ROXEL)

- Mise en oeuvre de la thermographie infrarouge



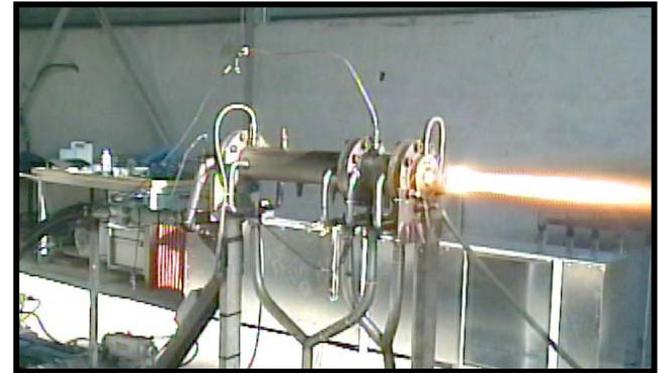
protection du chemin optique contre les fumées
découplage mécanique support caméra & miroir
régulation thermique de la caméra (caisson)

Essais d'impact de flamme torche (ROXEL)

- Flamme torche
 - Mélange kérosène / air
 - Pression chambre = 36 bars
 - Température chambre = 1700°C
 - Diamètre = 25.4 mm
 - Plaque Ta6V, épaisseurs 5 & 10 mm



Essai flamme libre



Plaque après essai



Essais d'impact de flamme torche (ROXEL)

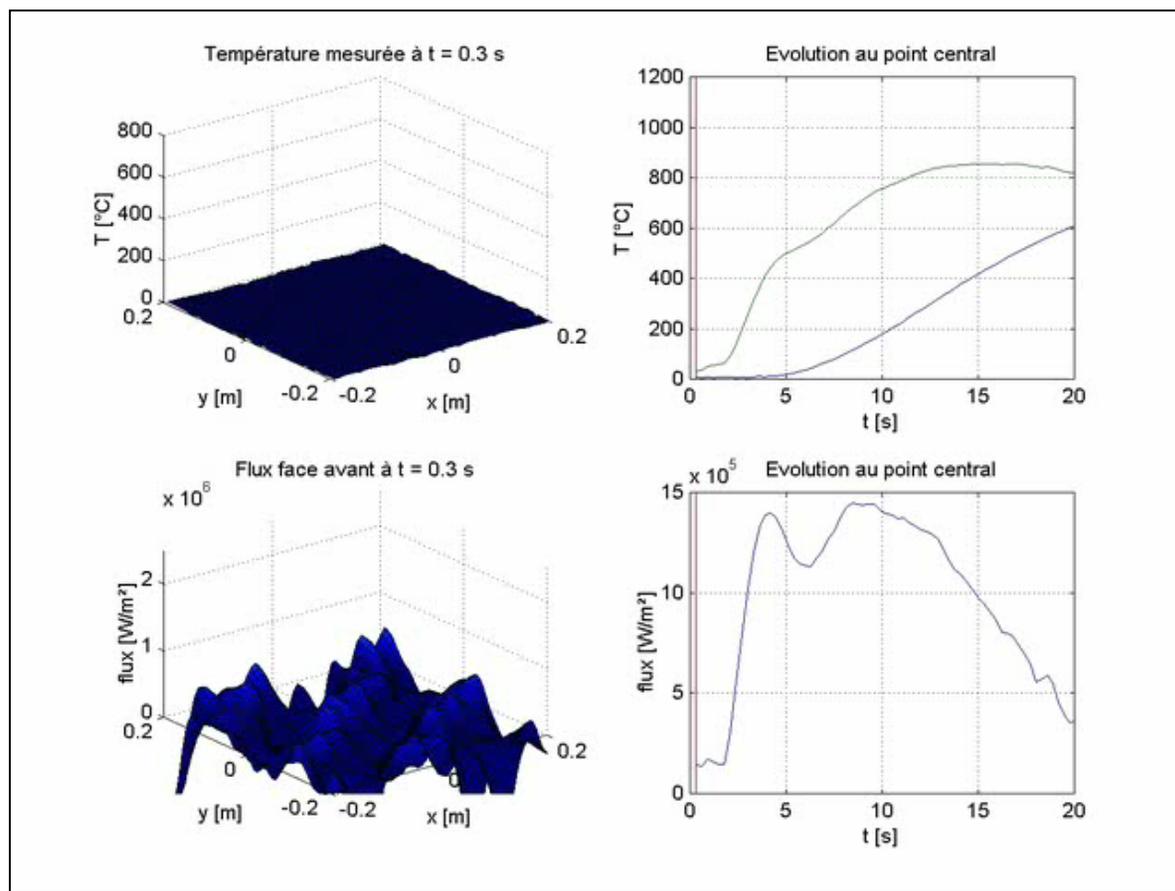
- Paramètres explorés
 - épaisseur de la plaque
 - distance buse – plaque
 - angle d'incidence de la flamme
 - pression d'alimentation chambre

Essais d'impact de flamme torche (ROXEL)

- Exemple de résultat d'identification

- flamme :
 - pression=36 bars
 - température = 1700°C
- distance :
 - H = 200 mm
 - H/D = 7.9
 - incidence normale
- plaque :
 - titane Ta6V
 - épaisseur 10 mm

ESSAI 010



Essais d'impact de flamme

- Mise en oeuvre de la méthode inverse / mesure par ThIR pour des essais industriels
 - ambiance difficile (vibrations, conditions de température...)
 - échauffement très rapide des plaques
 - épaisseur des plaques importante (temps de conduction long ~10s)
 - résultats en termes de flux satisfaisants
- Difficultés rencontrées
 - étalonnage de la caméra IR (NUC) à haute température (jusqu'à 1000°C)
 - faible sensibilité de la mesure à basse température
 - problèmes de dégradation de la peinture haute émissivité (face mesure)

Plan de l'exposé

- Méthode inverse d'identification
- Essais d'impact de jet chaud supersonique
- Essais d'impact de flamme
- Essais en soufflerie hypersonique
- **Conclusions - Perspectives**

- **Développement d'une méthode inverse**
 - identification de cartographies de flux et température instationnaires
 - mesure de température par thermographie infrarouge
 - utilisation de la T.C.D. (méthode de régularisation & réduction du nombre d'inconnues)
- **Applications**
 - essais de laboratoire (impact de jet chaud supersonique, impact de flamme propane-air)
 - essais industriels (flamme torche kérosène, soufflerie hypersonique F4)
- **Poursuite des travaux**
 - généralisation à des maillages non cartésiens
 - objets de géométrie plus complexe
 - mesures ponctuelles (par ex. thermocouples) & optimisation du placement des capteurs