

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

ONERA

Comparaison calculs/expériences sur le refroidissement par impact de jets subsoniques

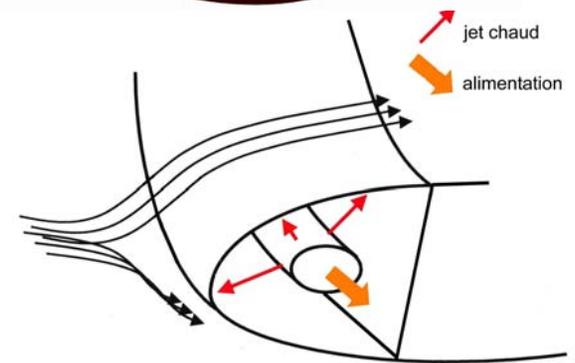
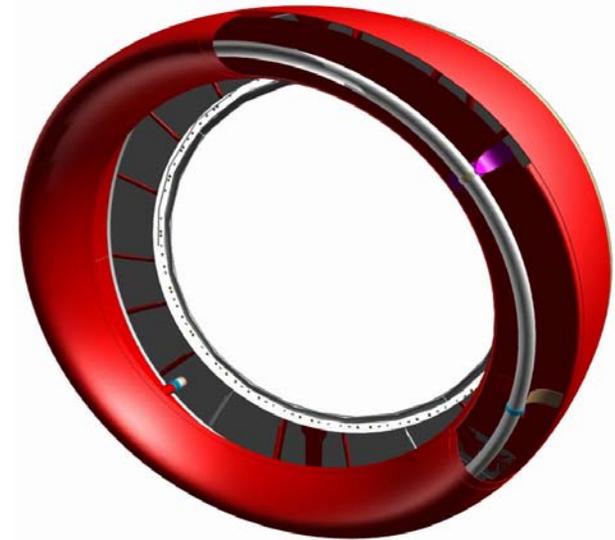
Cadre de l'étude

- **Projet MAEVA : collaboration Airbus/ONERA**
 - Développer des outils de calculs prédictifs des transferts de chaleur locaux et globaux
 - Applications
 - Systèmes de dégivrage
 - Caissons abritant les équipements
- **Mesures expérimentales sur deux configurations de jets impactants :**
 - Jet froid unique impactant une paroi plane chauffée
 - Ligne de jets chauds impactant une paroi concave

Contexte industriel



Système antigivrage piccolo



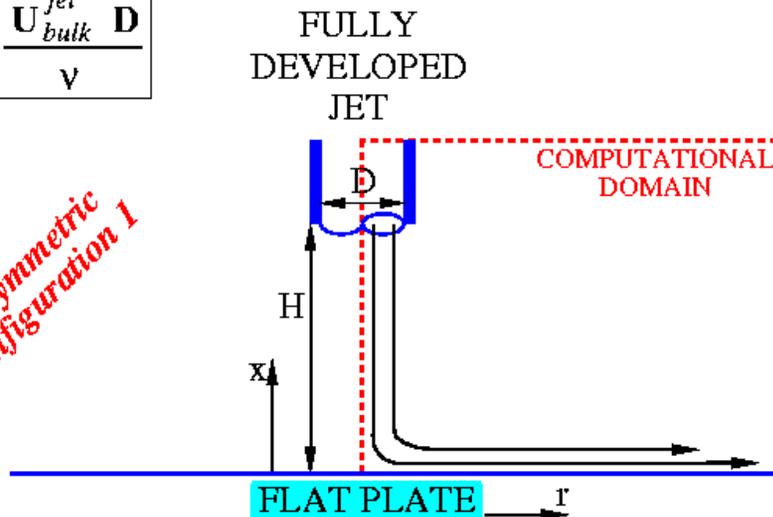
ONERA

Première configuration : jet unique impactant une paroi plane chauffée

Impinging jet heat transfer

$$Re = \frac{U_{bulk}^{jet} D}{\nu}$$

*axisymmetric
configuration 1*

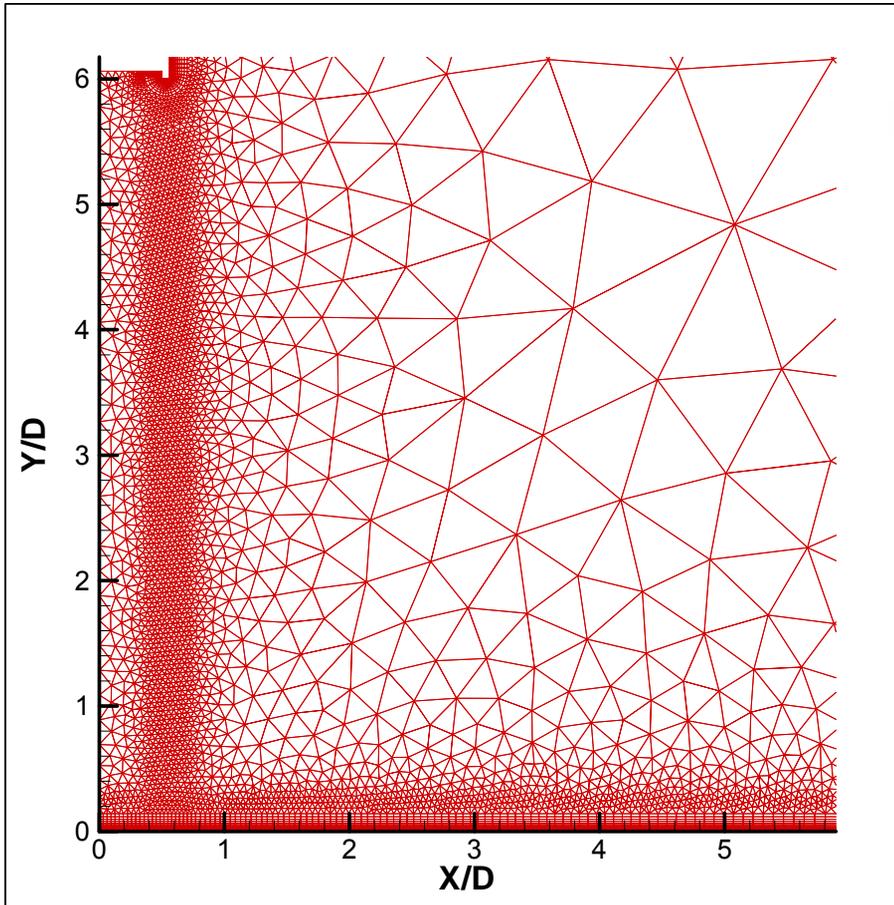


- Écoulement turbulent pleinement développé en entrée
- $Re_D = 23000$
- $H/D = 6$
- Mesures expérimentales effectuées à l'IMFT :
 - Mesures dynamiques :
 - PIV
 - fil chaud
 - Mesures thermiques
 - Thermographie IR
 - Fil froid

Simulations CEDRE : Présentation du code

- Code de calcul multiphysique en maillages non structurés généralisés à finalité énergétique :
 - Solveur Navier-Stokes
 - Intégration en temps : explicite ou implicite
 - Discrétisation spatiale : approche « Volumes finis »
 - Solveurs diphasiques eulériens et lagrangiens
 - Solveur de conduction
 - Possibilité de couplage entre les solveurs

Simulations CEDRE : Maillage



→ Direction radiale

➤ Maillage 2D axisymétrique :

➤ Triangles + quadrilatères près des parois pour bien capter les couches limites ($y^+ < 1$)

➤ Raffinement du maillage dans la couche de mélange

➤ Dimensions du domaine :

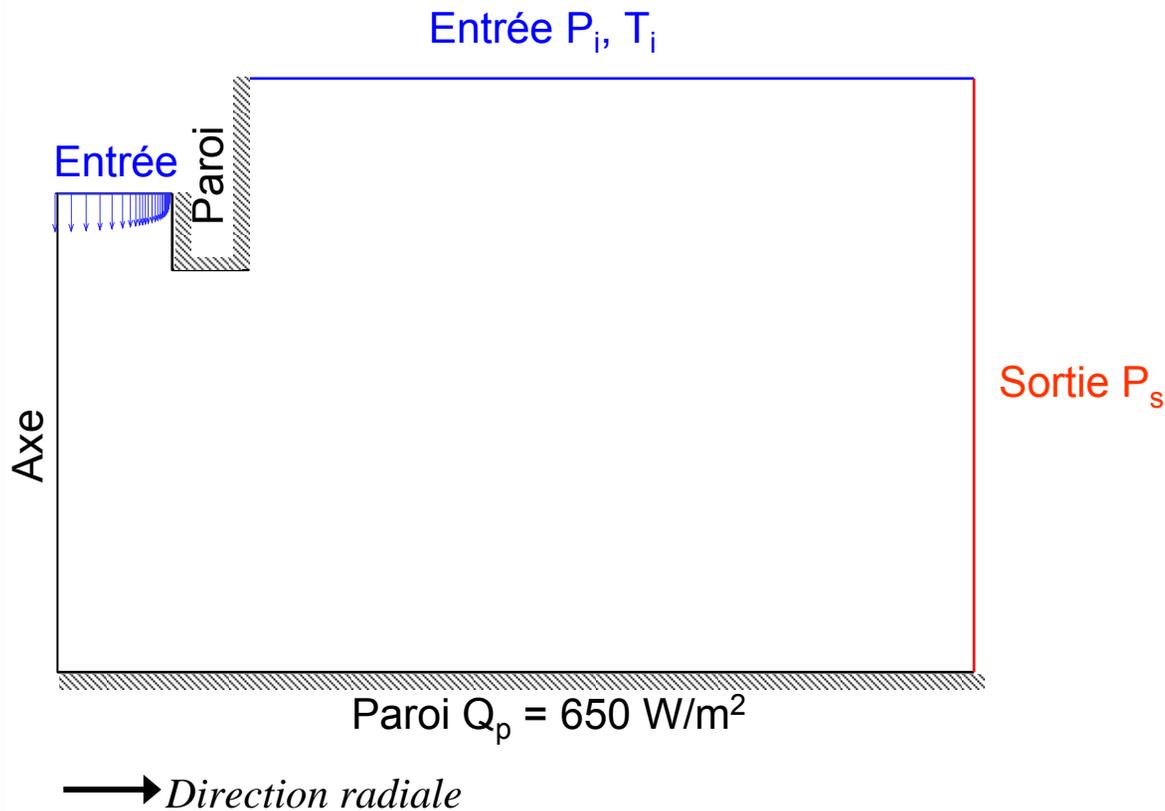
- Hauteur : 7,5 D

- Longueur (radiale) : 20 D

➤ 12900 cellules

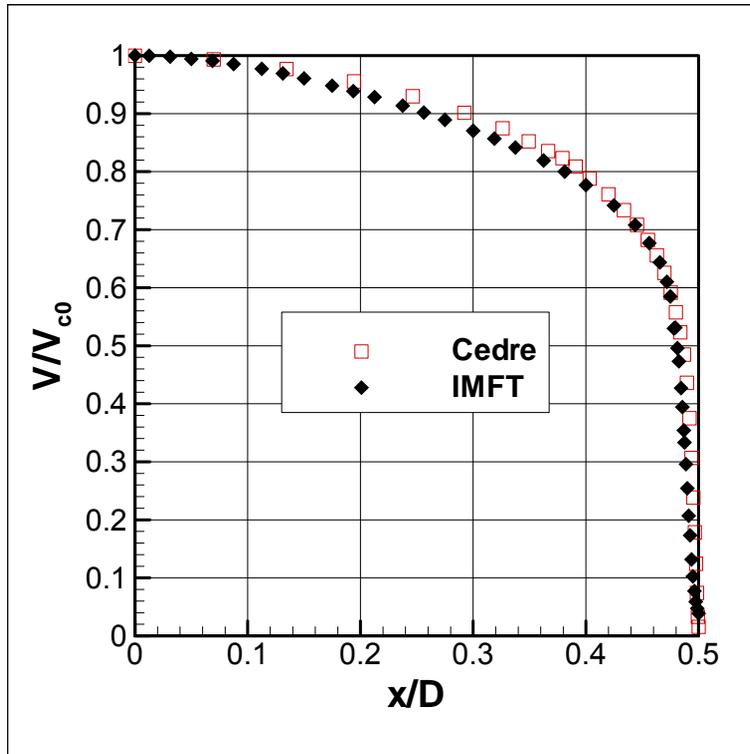
ONERA

Simulations CEDRE : conditions aux limites

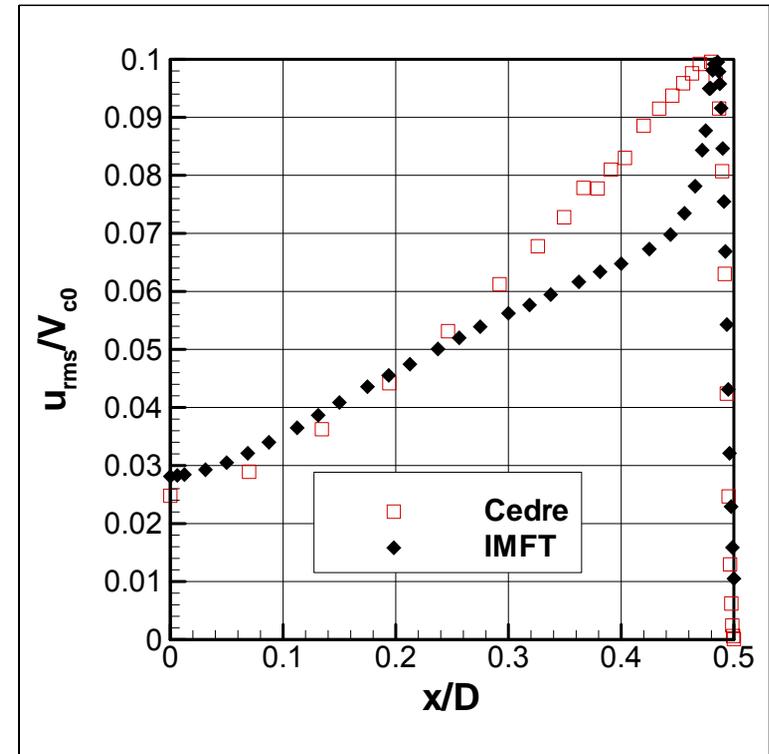


- Profil d'entrée déterminé par un calcul d'écoulement turbulent pleinement développé dans un canal

Simulations CEDRE : comparaisons des profils d'entrée calculés et expérimentaux



Profil de vitesse



Profil d'intensité turbulente

Simulations CEDRE : modélisation turbulente

➤ Difficultés :

- Les modèles k-ε surestiment le taux d'ouverture des jets axisymétriques
- Tendance connue des modèles de turbulence à surestimer le coefficient d'échange à l'impact

➤ Solutions adoptées :

- Utilisation d'un jeu de constante « modifié » dans le modèle k-ε pour une meilleure prédiction de l'ouverture des jets axi :
 - Jeu de constantes « classique » :
 $c_{\epsilon 1} = 1,44$; $c_{\epsilon 2} = 1,92$; $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\epsilon = 1,3$.
 - Jeu de constantes « modifié » :
 $c_{\epsilon 1} = 1,5$; $c_{\epsilon 2} = 1,82$; $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\epsilon = 1,7$.

Simulations CEDRE : modélisation turbulente (suite)

- Utilisation d'une condition de réalisabilité pour limiter la production de turbulence à l'impact :

$$v_t = \frac{c_\mu k}{\max\left(\frac{\varepsilon}{k}, \alpha \sqrt{2c_\mu D^2}\right)} \Rightarrow |\overline{u'v'}| \leq \frac{\sqrt{c_\mu}}{\alpha} k$$

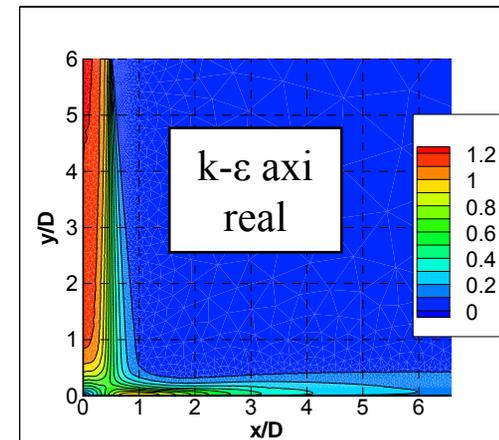
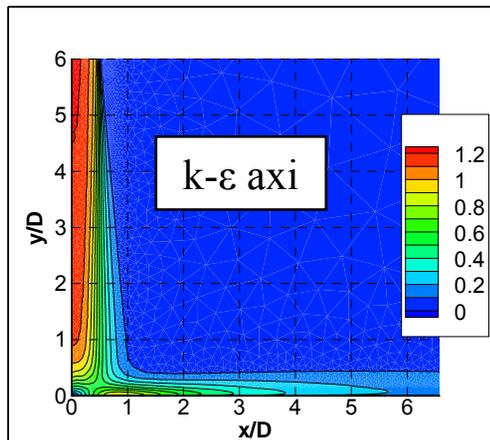
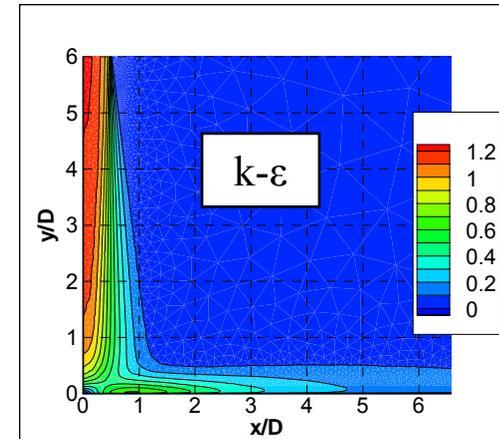
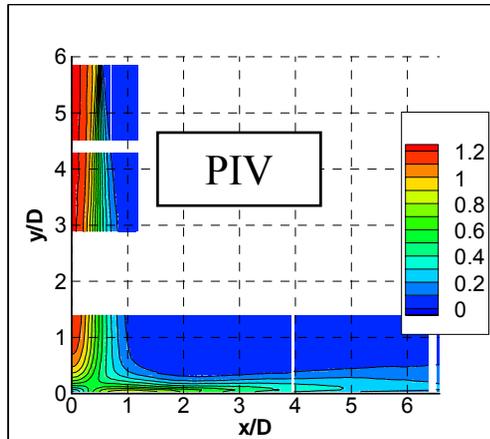
- $C_\mu = 0,09$
- $D =$ Déviateur du tenseur des déformations

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right)$$

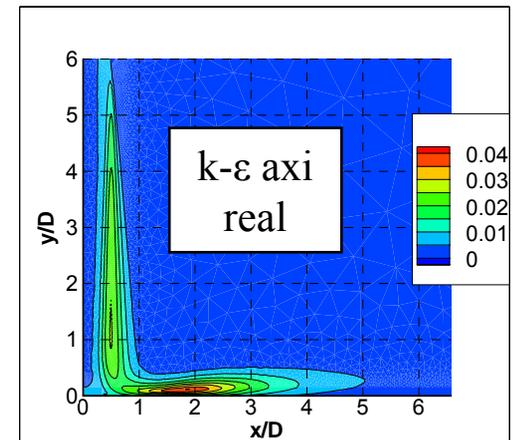
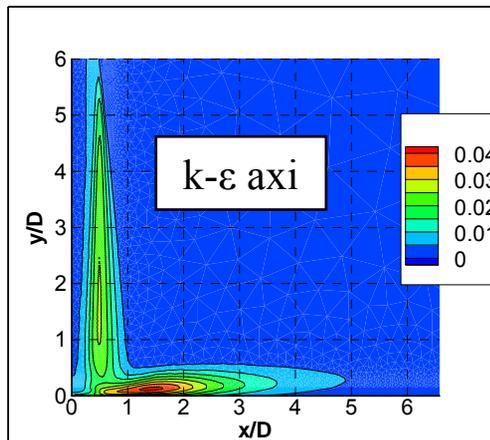
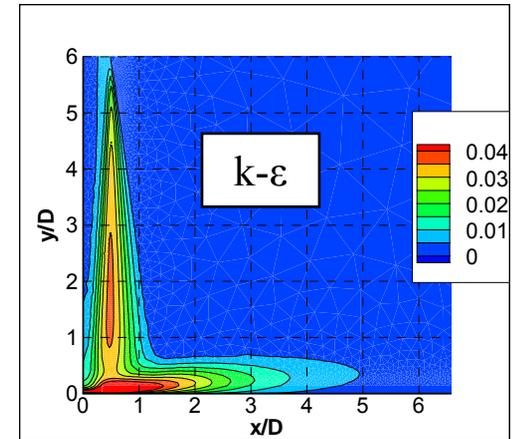
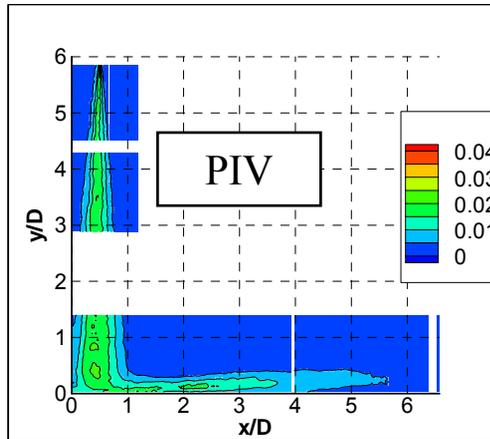
$$D_{ij} = S_{ij} - \frac{1}{3} S_{kk} \delta_{ij}$$

- α est la constante de réalisabilité prise égale à 1.

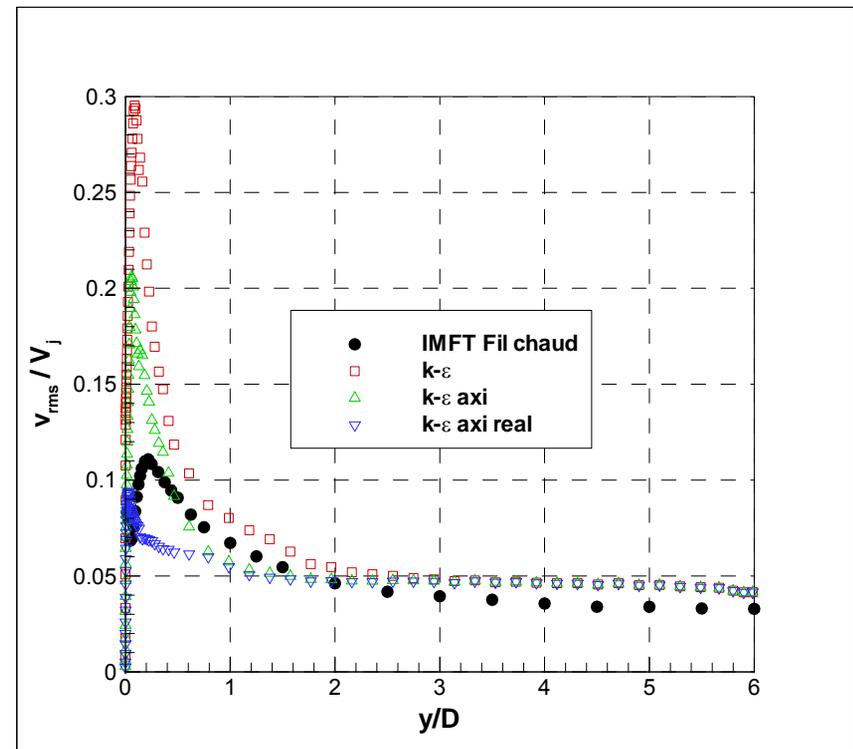
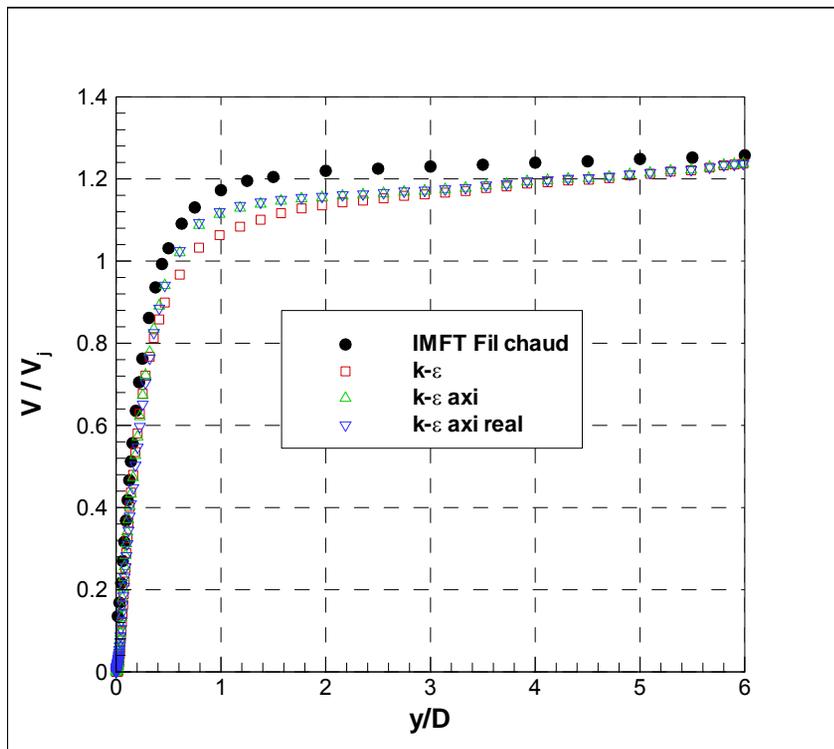
Résultats : champs de vitesse



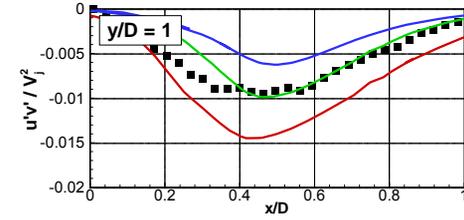
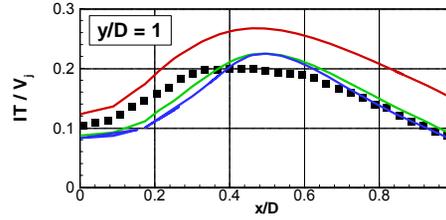
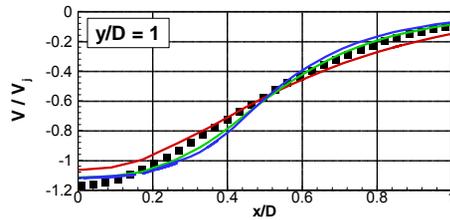
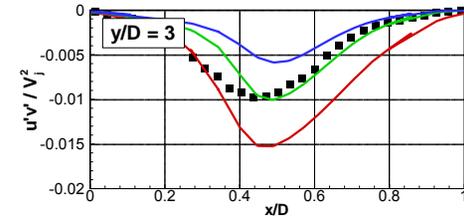
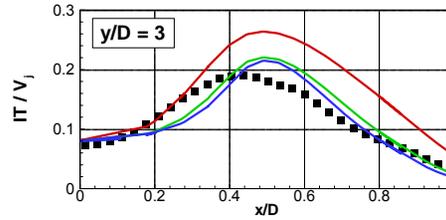
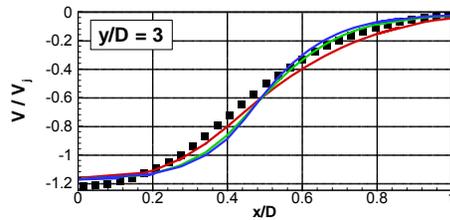
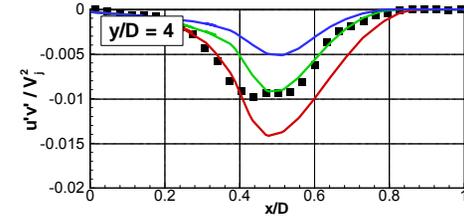
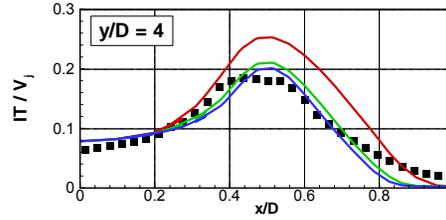
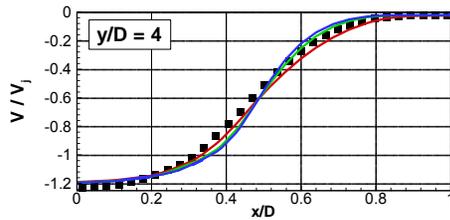
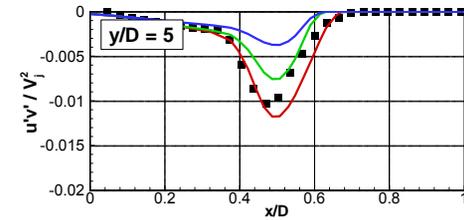
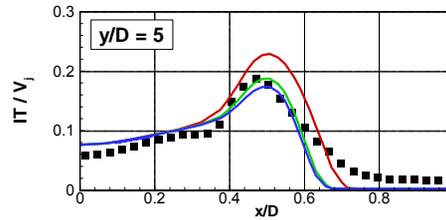
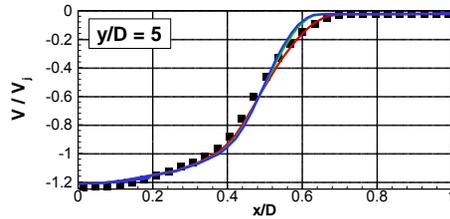
Résultats : champs d'énergie cinétique turbulente



Résultats : évolution des grandeurs sur l'axe



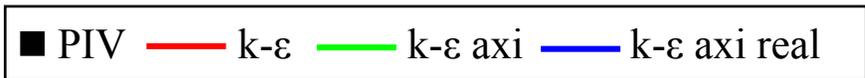
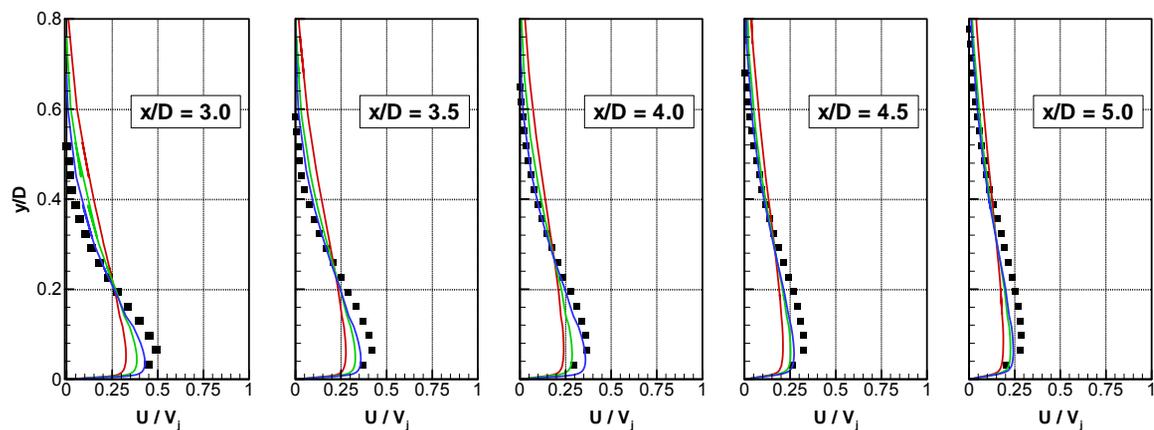
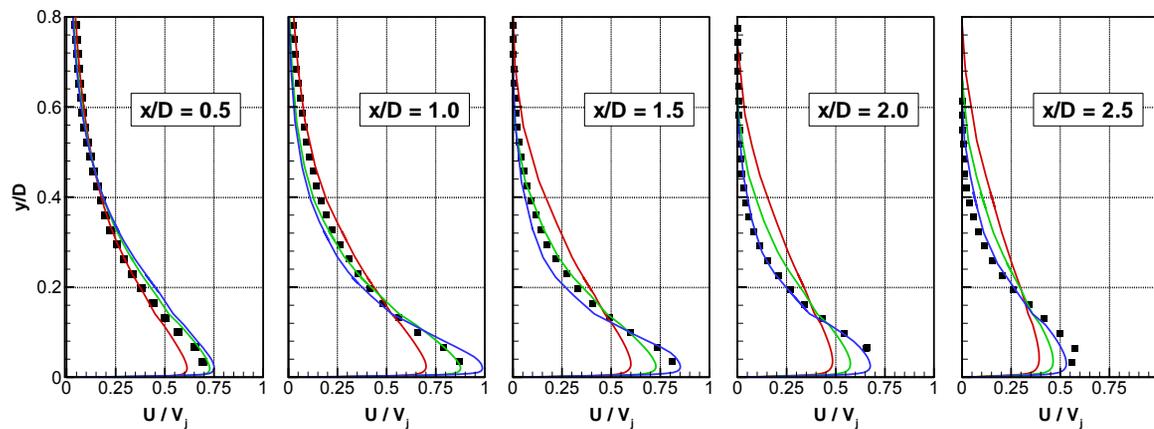
Résultats : distributions radiales dans le jet



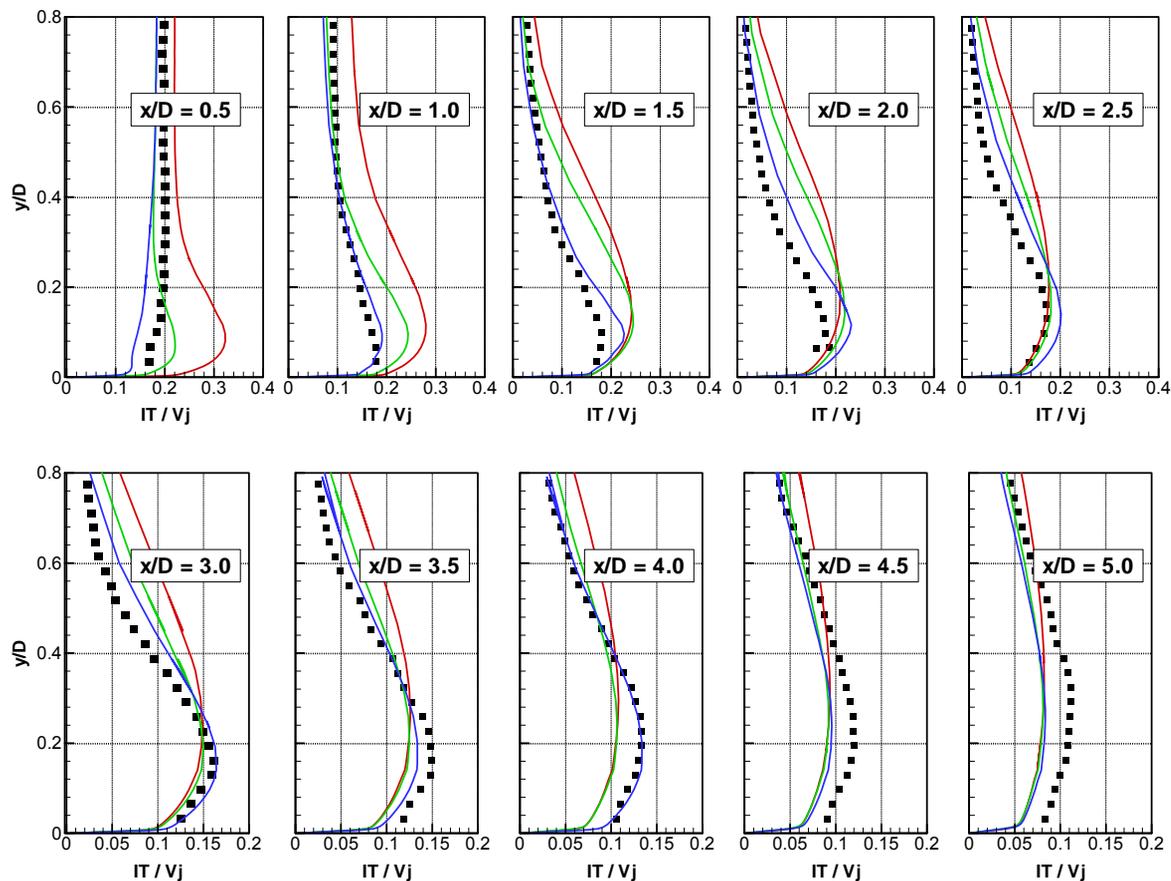
PIV
 k-ε
 k-ε axi
 k-ε axi real



Résultats : profils de vitesse radiale dans le jet de paroi

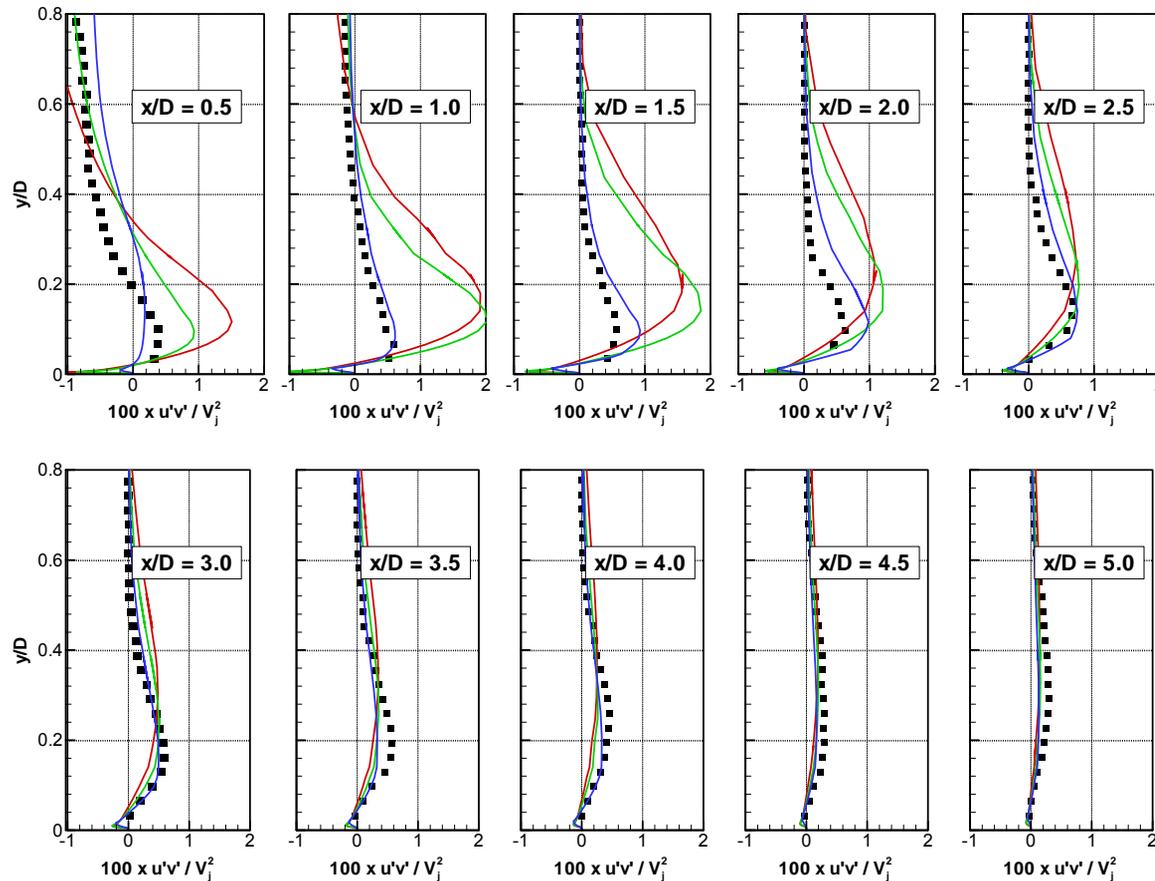


Résultats : profils d'intensité turbulente dans le jet de paroi



■ PIV — $k-\epsilon$ — $k-\epsilon$ axi — $k-\epsilon$ axi real

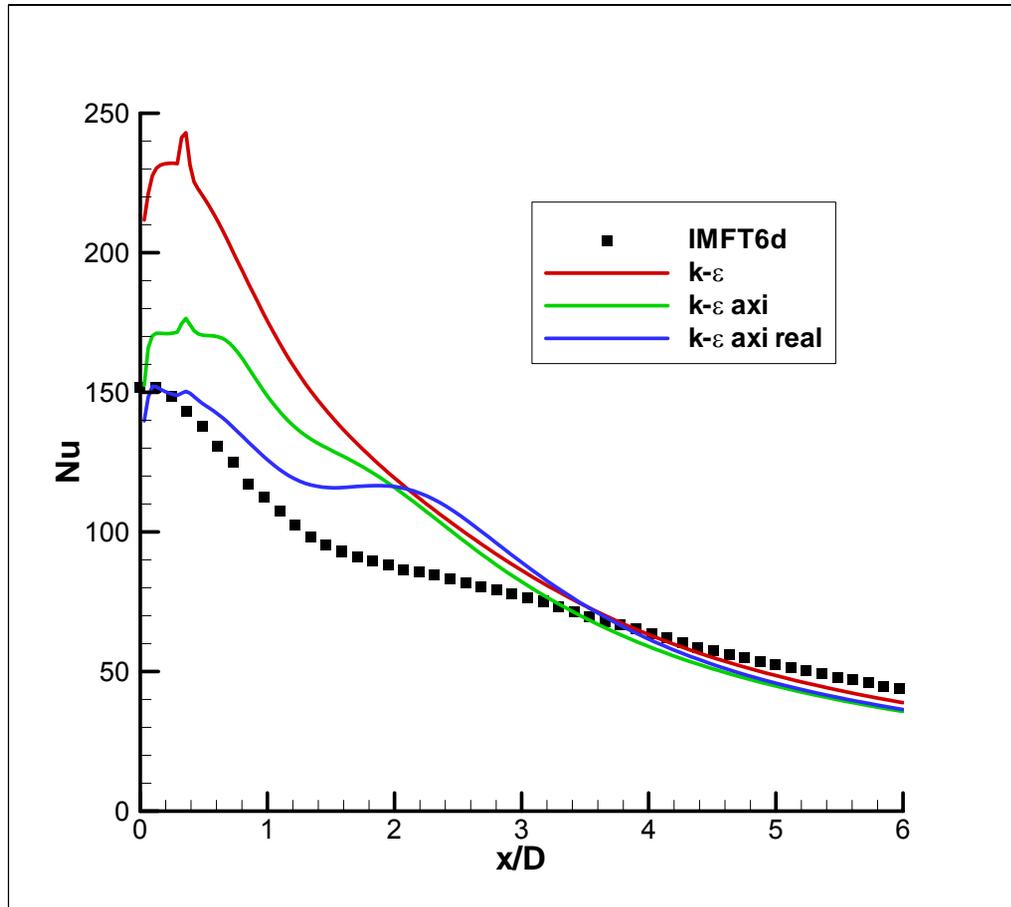
Résultats : profils de tension de Reynolds dans le jet de paroi



■ PIV — $k-\epsilon$ — $k-\epsilon$ axi — $k-\epsilon$ axi real



Distribution du Nusselt



■ PIV — k-ε — k-ε axi — k-ε axi real

Deuxième configuration : impact de jets multiples sur une paroi concave

- Bibliographie - Conception de l'expérience
 - similitude du problème industriel (Mach et Reynolds)
- Caractérisation dynamique
 - jets libres froids (film chaud)
 - jets impactants froids (PIV)
 - jets libres chauds (LDV)
- Caractérisation thermique
 - variation de la distance jet - paroi
 - variation du pas entre les jets

Synthèse bibliographique

- Caractéristiques de l'écoulement à simuler
 - jets circulaires ($d = 2 \text{ mm}$),
 - jets turbulents ($Re_d \approx 2 \cdot 10^4$),
 - jets chauds ($T \approx 400^\circ\text{C}$),
 - écoulement compressible ($M \approx 0.8$),
 - effets de confinement,
 - jets immergés,
 - impact sur une surface concave.
- Expérience en similitude de Mach et Reynolds
 - même diamètre de jets
 - température plus faible

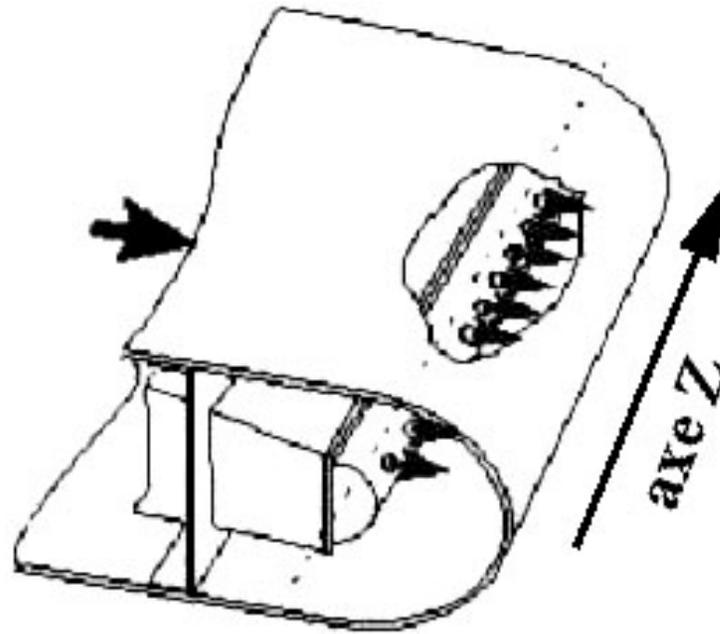
Synthèse bibliographique

- Effets dynamiques
 - la forme de l'injecteur (longueur du cône potentiel)
 - le pas d'espacement des jets
- Transferts thermiques
 - les paramètres d'alimentation des jets : Re_d , M
 - le pas d'espacement des jets
 - la concavité de la paroi d'impact
 - la distance buse - paroi

Expérimentation en similitude Mach et Reynolds

➤ Injecteur

- diamètre des injecteurs : $d = 2 \text{ mm}$ (injecteurs à bords épais)
- pas entre les jets : $p = 10 \text{ mm}$ ($p/d = 5, 10, 15, \dots$)



Caractérisation dynamique par PIV

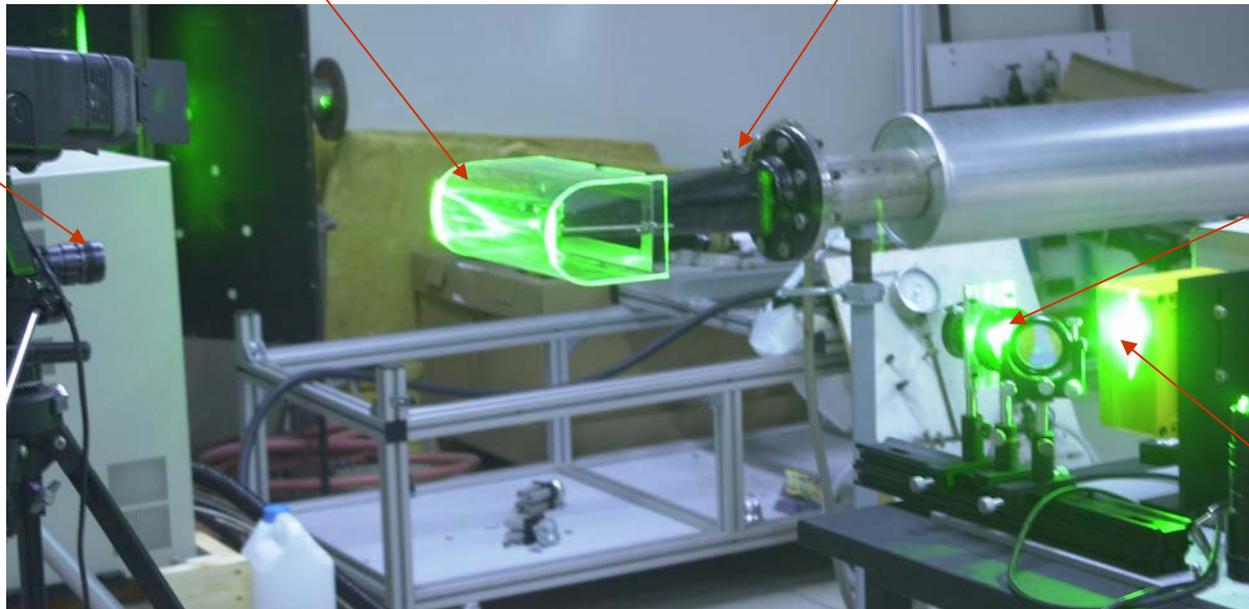
➤ Jets froids impactant sur paroi plexiglas

➤ $M = 0.83$, $Re_d = 43000$

Paroi concave en plexiglas

Système d'injection d'encens

Caméra



Système de
génération de
la nappe laser

Laser Nd:Yag
400 mJ/imp
532 nm

ONERA

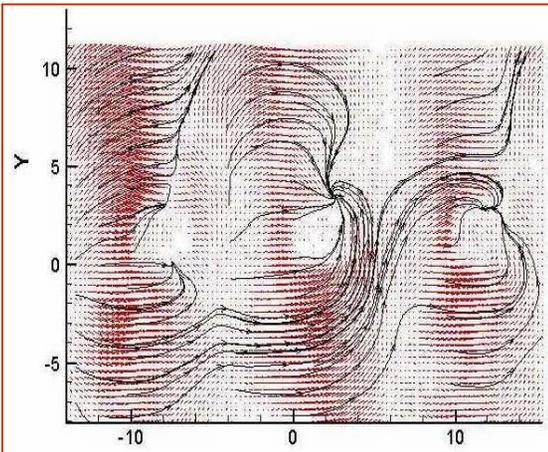
Caractérisation dynamique par PIV

- Acquisition de doublets d'images de particules ($F = 6 \text{ Hz}$, $\Delta t = 1 \text{ ms}$)
- Traitement des images par intercorrélation

conf	caméra	nappe	H/d	Schéma
1	Face au jet	Perpendiculaire aux jets A 2mm de la paroi	5 et 3	
2	Perpendiculaire à l'axe du jet filmé	Face aux jets Centrée sur l'axe du deuxième jet	5 et 3	
3	Perpendiculaire aux buses	Face aux jets	5	

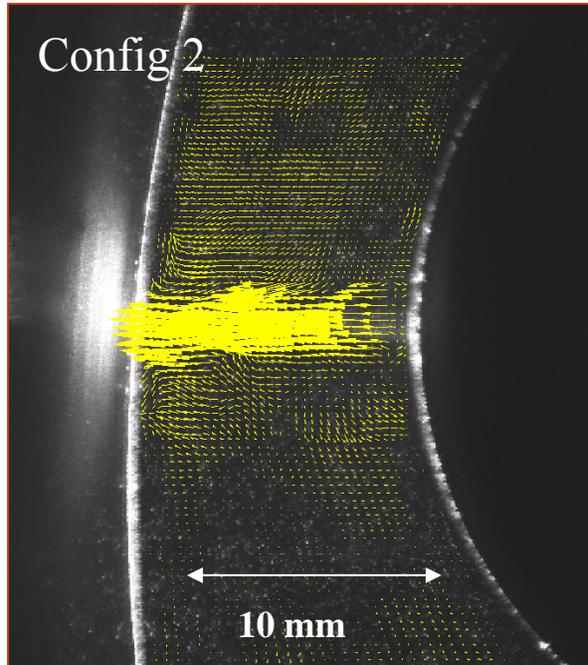
Caractérisation dynamique par PIV

Config 1



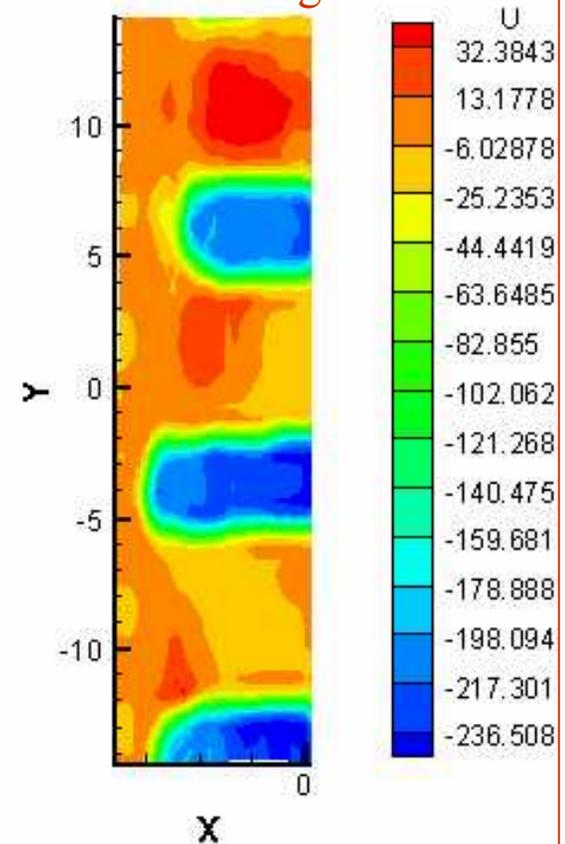
Champ de vitesse moyenne et lignes de courant ($H/d=5$)

Config 2



Champ de vitesse instantané superposé à l'image des particules ($H/d=5$)

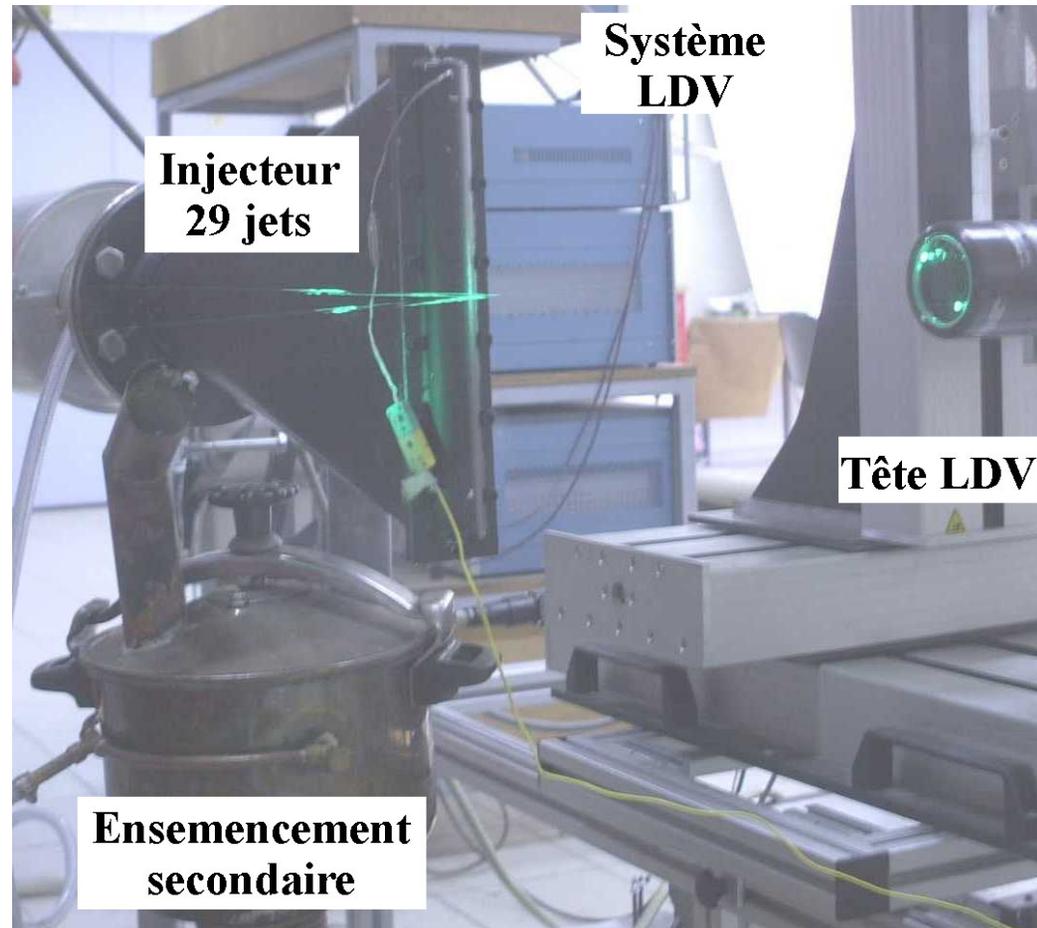
Config 3



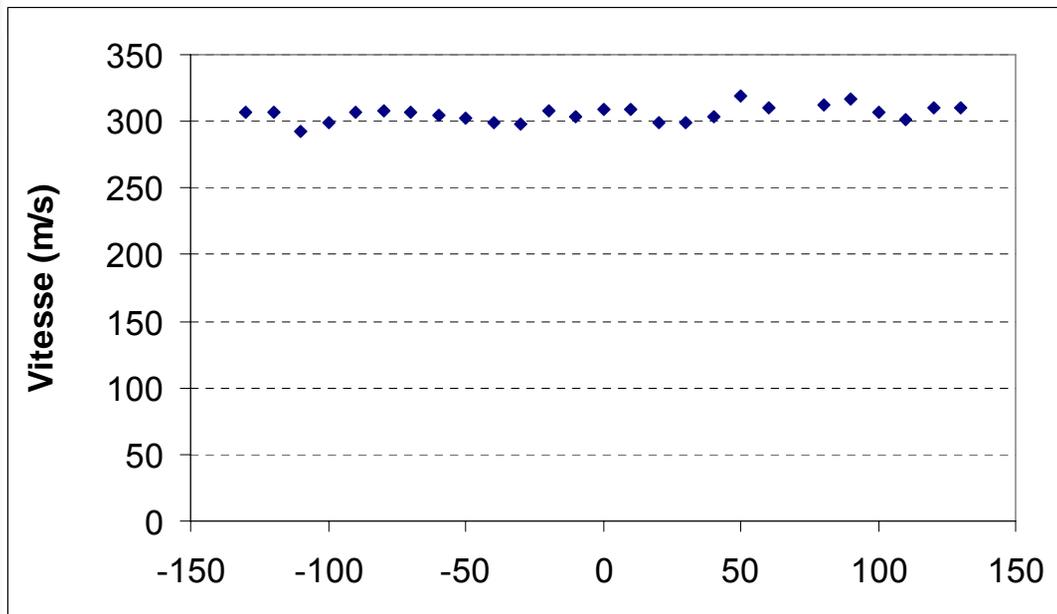
Champ de vitesse instantané Isovortices en U ($H/d=5$)

Caractérisation dynamique par LDV

- Jets libres chauds
 - $M = 0.85$
 - $Re_d = 37000$
 - Température totale
 $T_j = 75^\circ\text{C}$

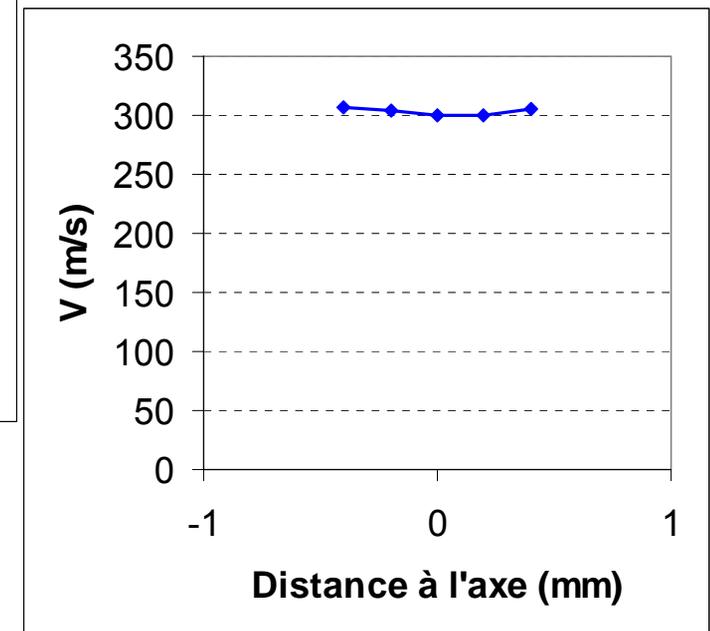


Caractérisation aérodynamique par LDV



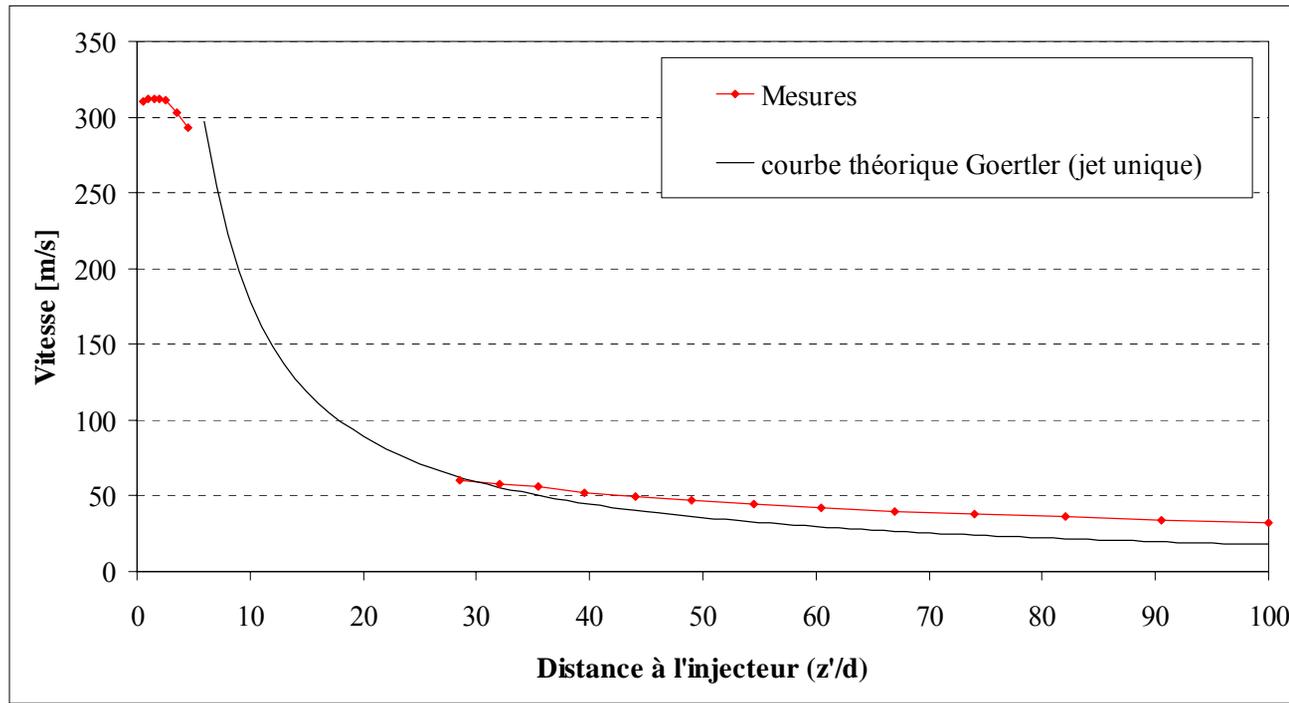
Exploration des 29 jets
distance 1 mm de la buse

Profil transverse dans 1 jet
distance 1 mm de la buse



Caractérisation aérodynamique par LDV

- Vitesse moyenne sur l'axe du jet central
- cône potentiel de longueur 4 d environ



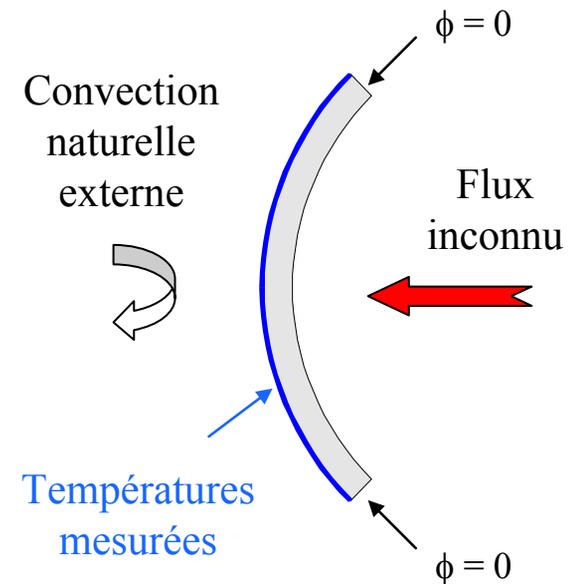
Caractérisation du transfert thermique

- Mesure de la température externe de la paroi d'impact lors de la mise en place des jets (thermographie infrarouge)
- Méthode inverse instationnaire 3D de conduction de la chaleur pour identifier le flux convectif interne et la température de paroi interne



Caractérisation du transfert thermique

- Hypothèse milieu mince non valable
- Méthode inverse
 - prise en compte des gradients thermiques dans l'épaisseur de la paroi d'impact
 - identification du flux interne et des températures internes à partir des mesures des températures externes
 - calcul du coefficient d'échange pariétal et du nombre de Nusselt
- Adaptation et validation de la M.I. pour la géométrie considérée
 - haute résolution spatiale p/r à l'épaisseur

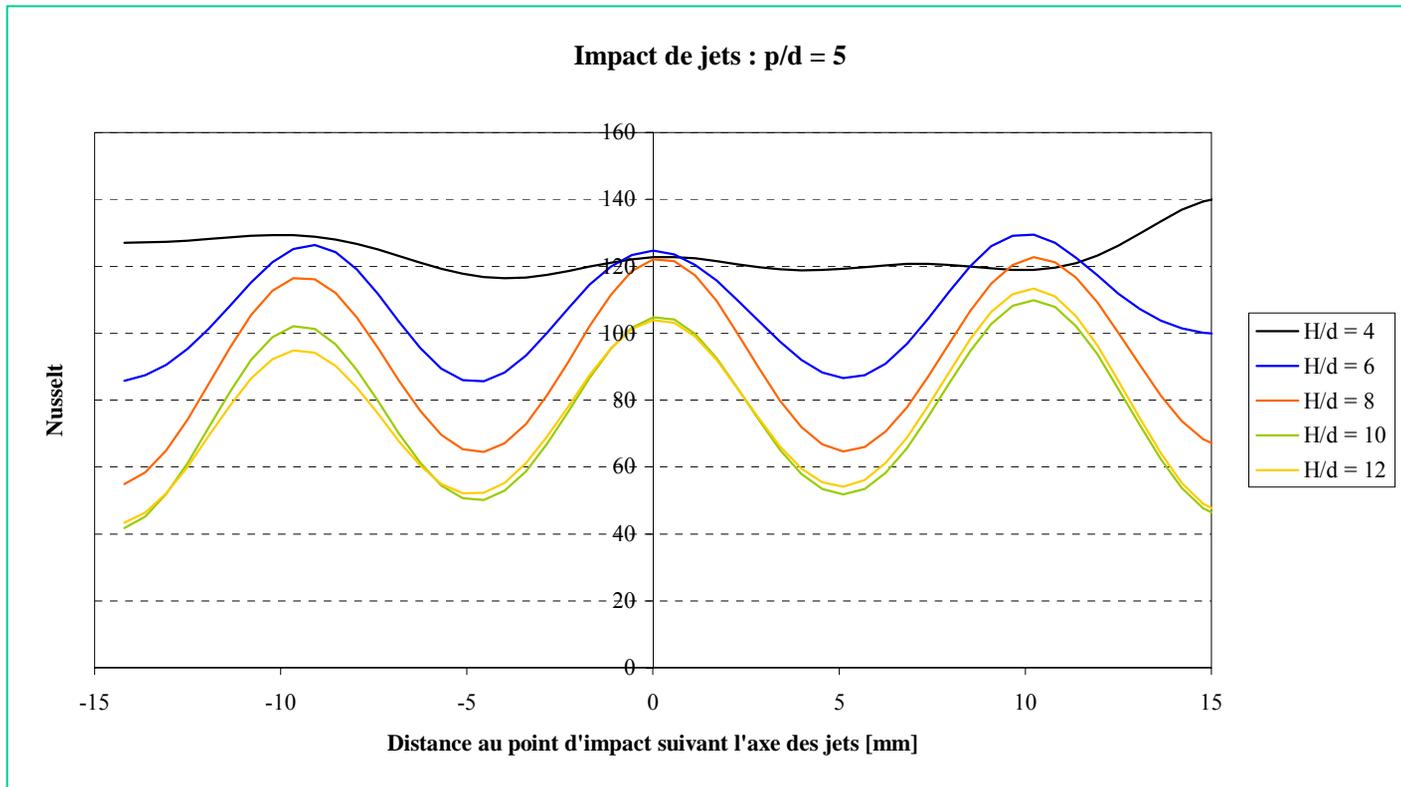


Caractérisation du transfert thermique

- Essais : $H/d = 2, 4, 6, 8, 10, 12$ (à $p/d = 5$)
- Essais : $p/d = 5, 10, 15$ (à $H/d = 5$)
- Acquisition des températures par ThIR
 - 5 jets de largeur / $\pm 30^\circ$ (sur la paroi d'impact)
 - extraction de 1 ou 3 jets au centre
 - résolution spatiale : env. $0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$

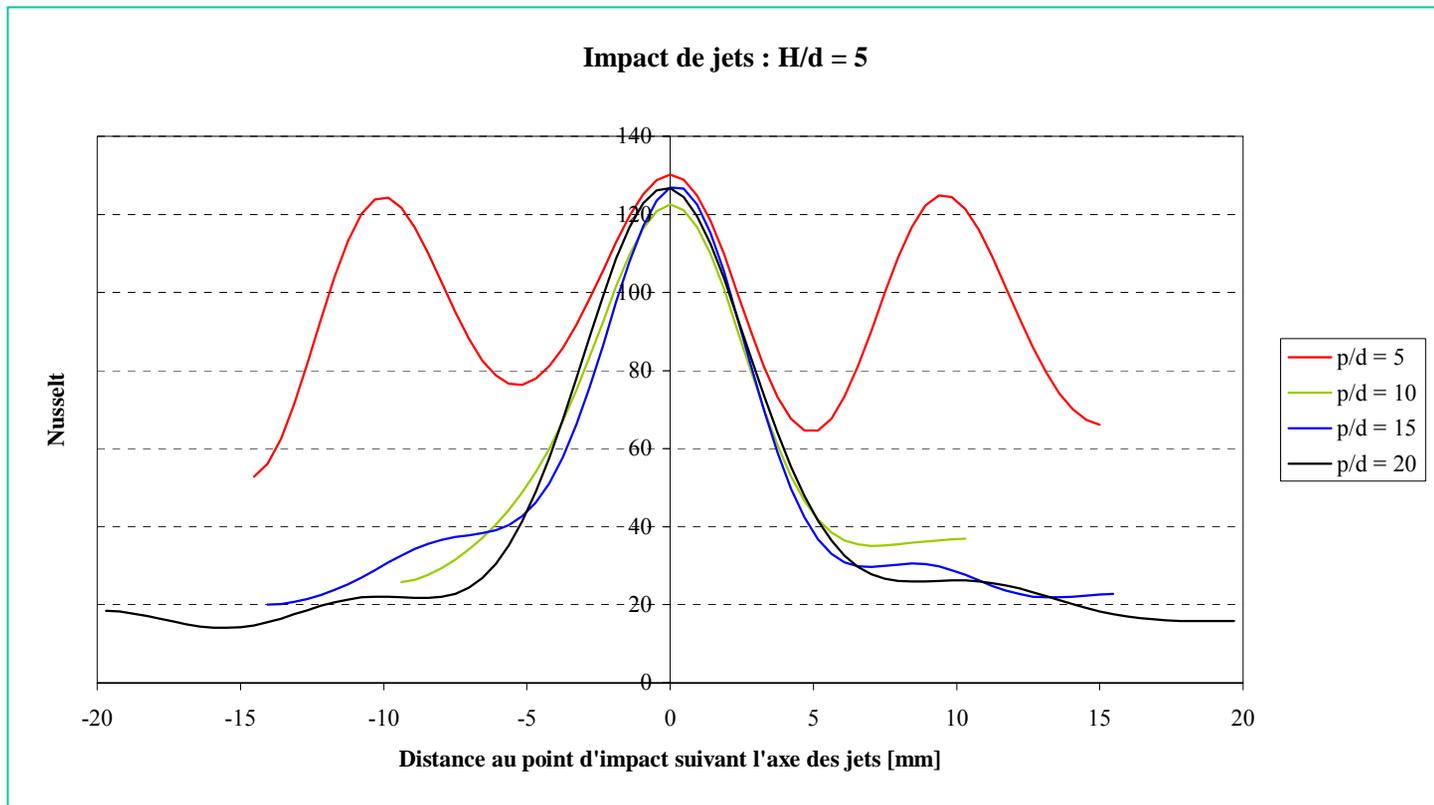
Caractérisation du transfert thermique

➤ Evolution suivant l'axe des jets : variation de H/d

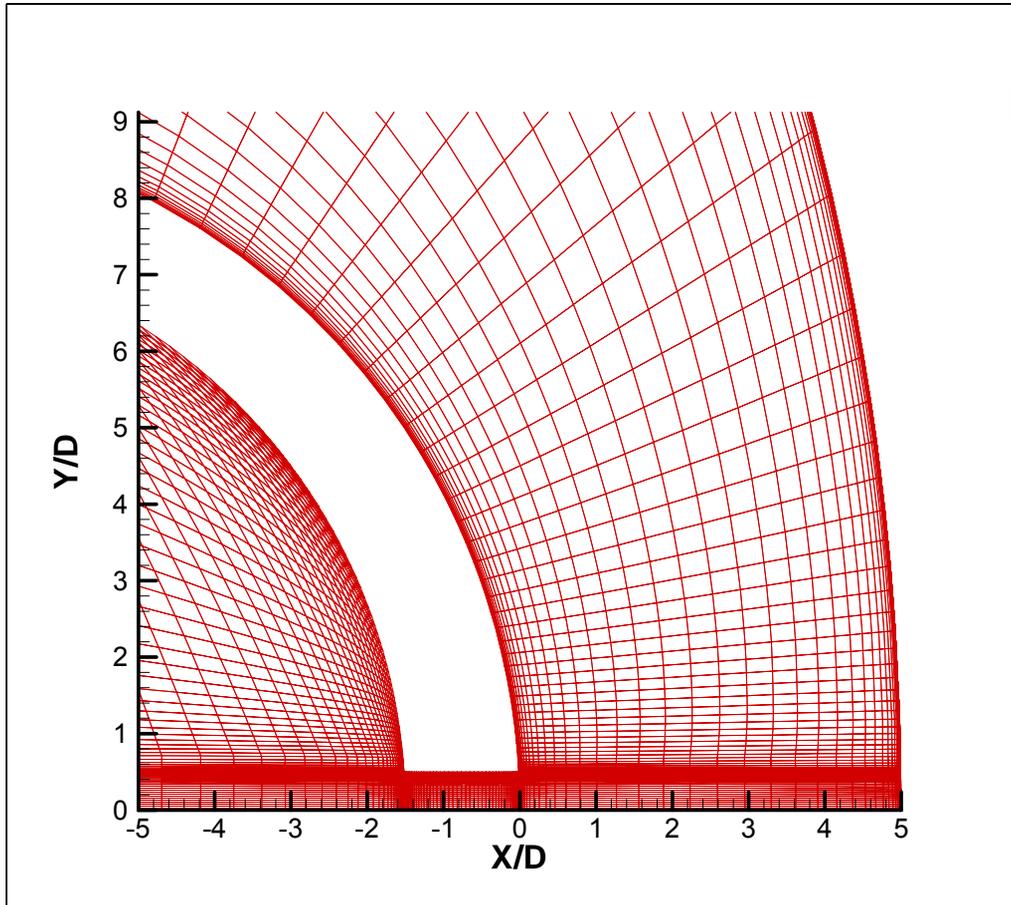


Caractérisation du transfert thermique

➤ Evolution suivant l'axe des jets : variation de p/d



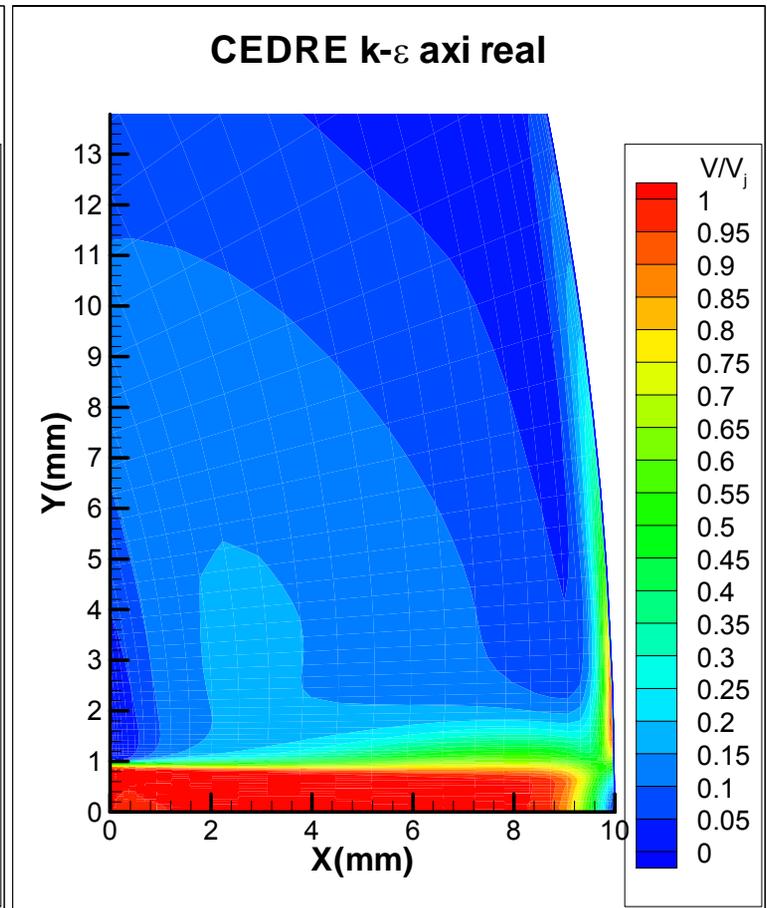
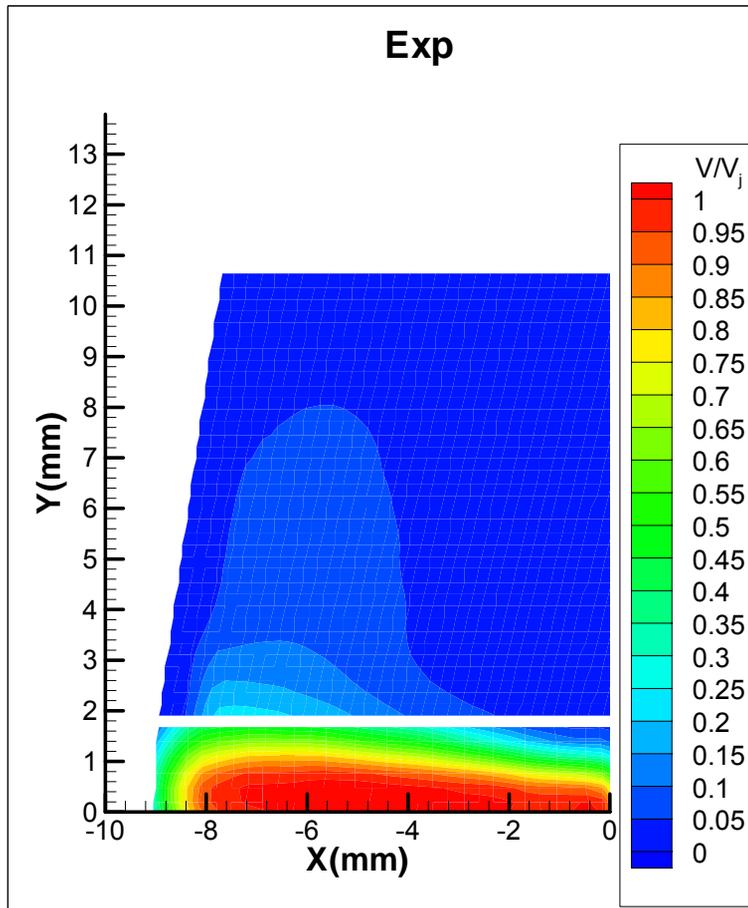
Simulations CEDRE : Maillage



➤ Maillage hexaédrique 3D :

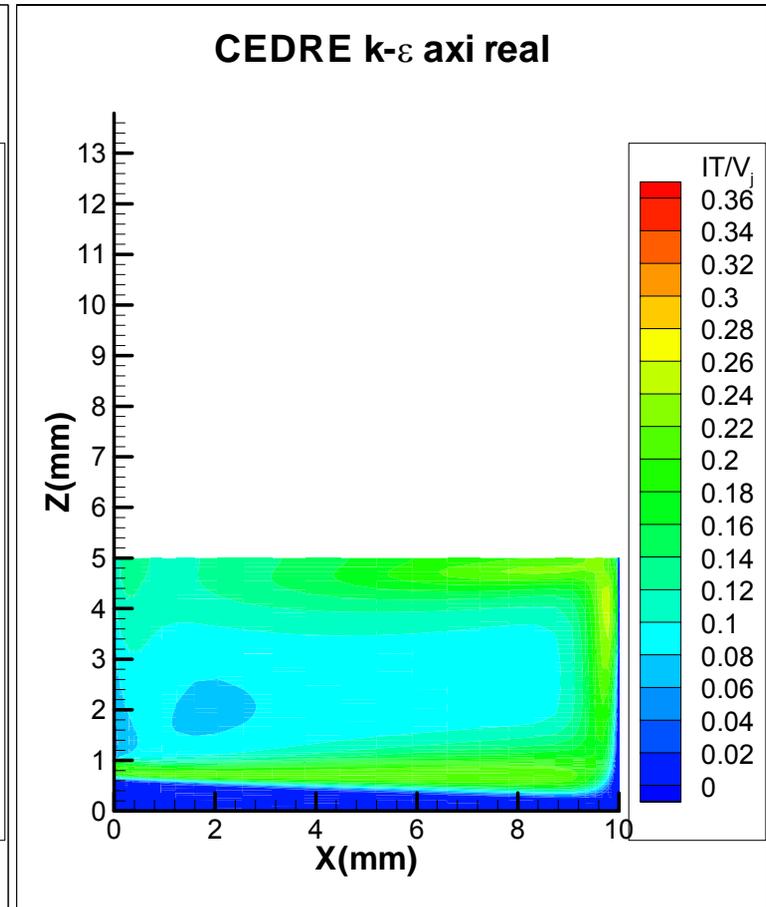
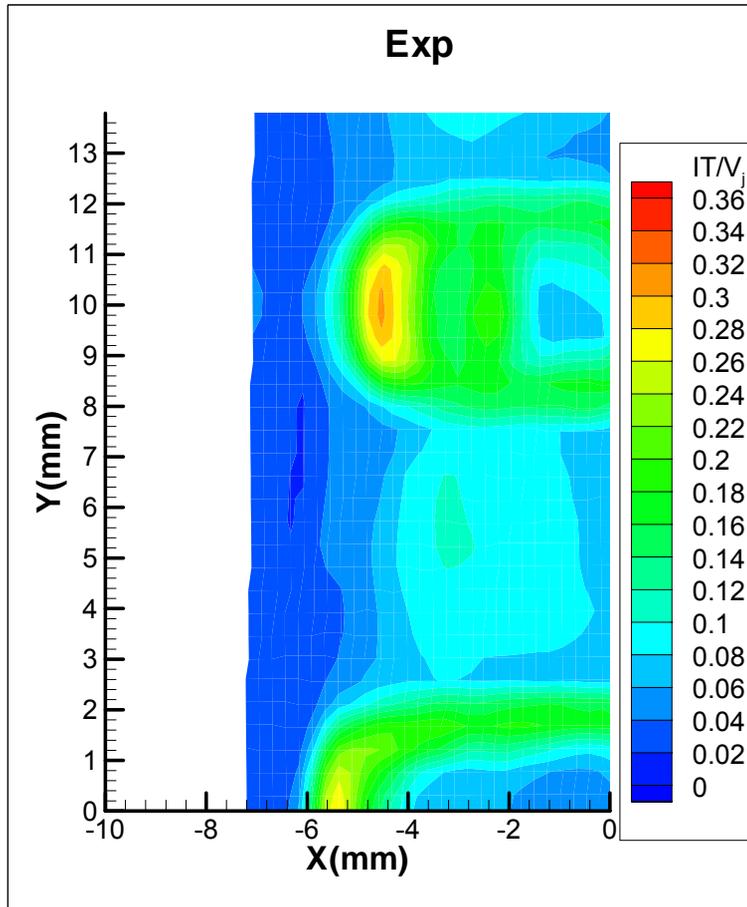
- Raffinement du maillage dans la couche de mélange et près des parois
- $y^+ < 0.1$ sur la paroi impactée
- 290000 cellules

Simulations CEDRE : Champ de vitesse

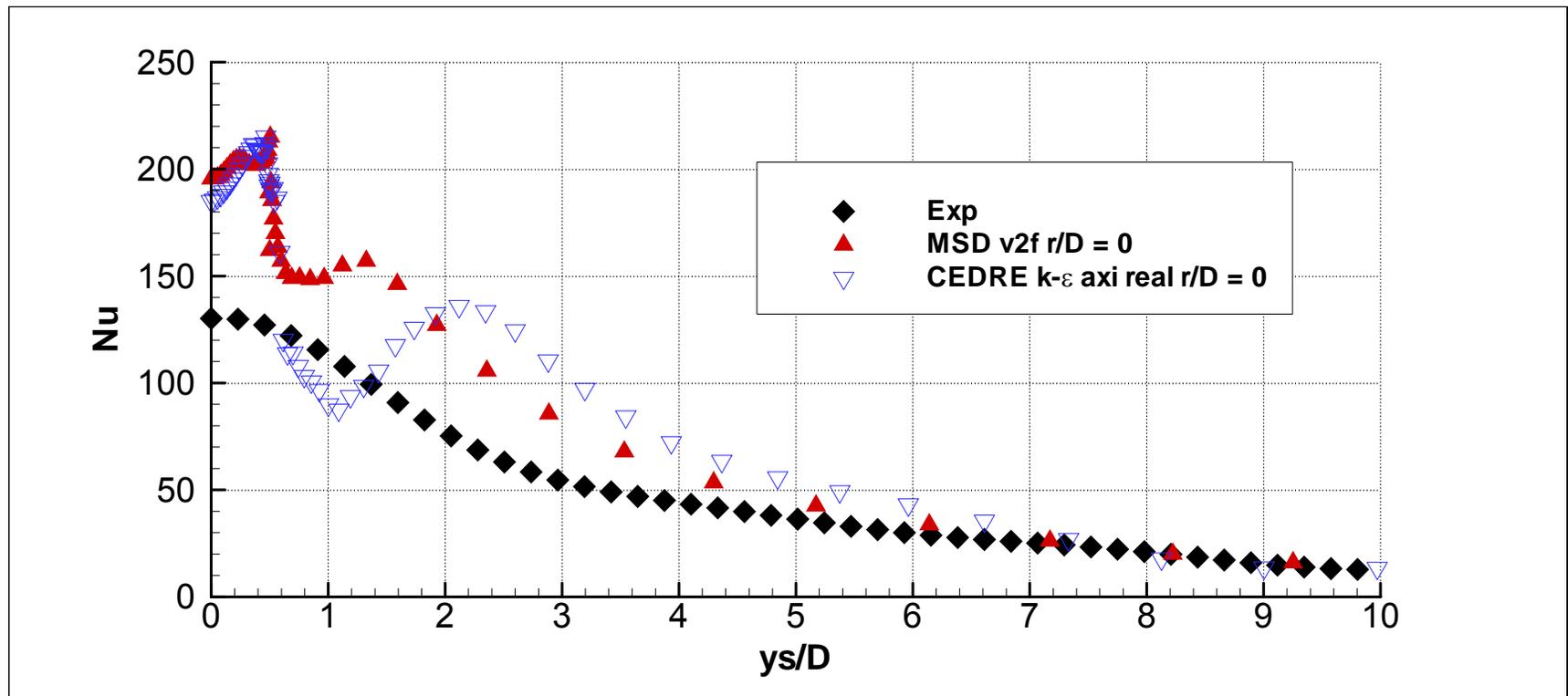


ONERA

Simulations CEDRE : Intensité turbulente



Simulations CEDRE : Distribution du Nusselt



Conclusions

- Mise en place d'une base de données, en dynamique et en thermique sur des configurations d'impact de jets (sur paroi plane et concave).
- Les premières validations donnent des résultats encourageants sur le jet unique impactant une paroi plane.
- Écarts importants sur entre simulations et expérience sur la ligne de jets impactant une paroi concave :
 - caractéristiques du jet en sortie d'injecteur mal reproduites?
 - écoulements secondaires liés aux jets adjacents?
 - influence de la concavité de la paroi?
 - influence de la conduction dans la paroi?