

Caractérisation Expérimentale et Simulations Numériques d'un Jet Chaud Impactant

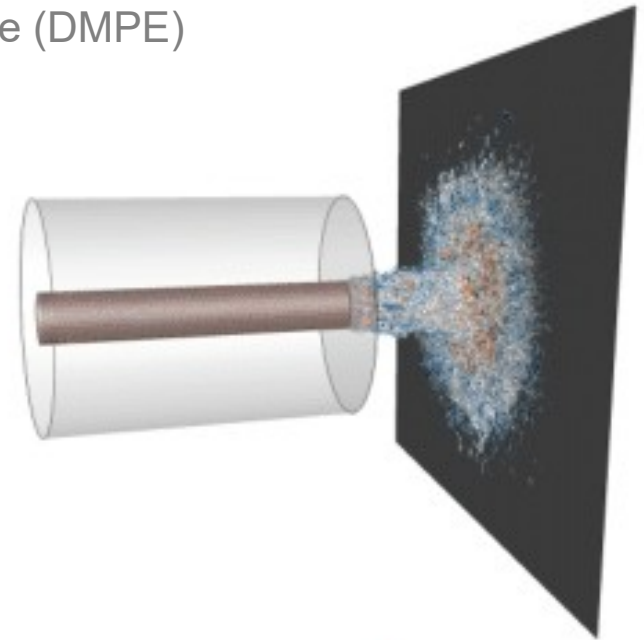
Pierre Grenson⁽¹⁾, Philippe Reulet⁽²⁾, Bertrand Aupoix

(1) ONERA, Département Aérodynamique, Aéroélasticité et Aéroacoustique (DAAA)

(2) ONERA, Département Multi-physique pour l'Energétique (DMPE)

Journée SFT

Jeudi 20 octobre 2022



Contexte et objectifs (1)

► Motivations

Intérêt industriel

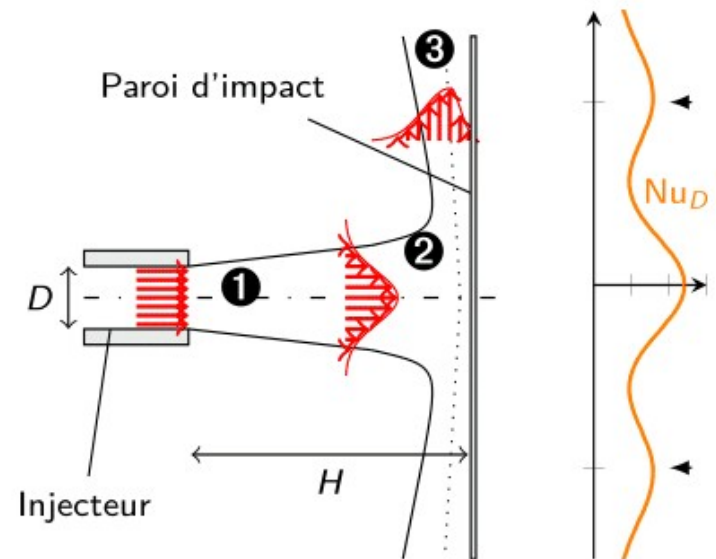
Efficacité élevée des transferts de chaleur atteints sur la paroi impactée.

Applications dans le domaine de l'aéronautique :

- Refroidissement des bords d'attaque des aubes de turbine.
- Chauffage des bords d'attaque des ailes (dispositif anti-givrage).



Intérêt scientifique Complexité de modélisation ← variété des régions caractéristiques de l'écoulement.



① Jet libre ② Région d'impact ③ Jet pariétal

- Apparition d'un second maximum pour les faibles distances d'impact ($H/D < 4$).

Contexte et objectifs (2)

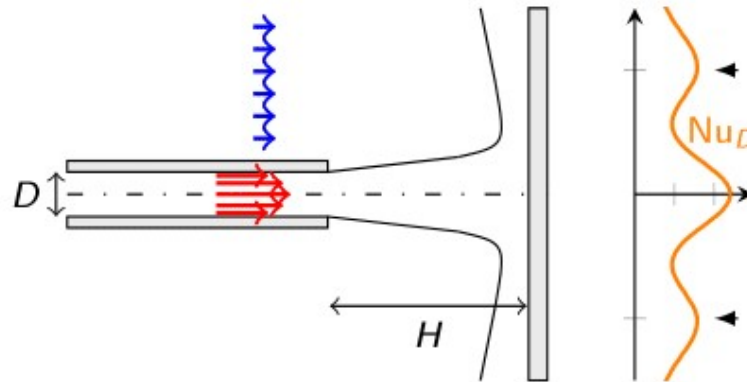
► Sélection d'une configuration

Constat de la littérature

- ✗ Peu d'études fournissant conjointement une caractérisation des échanges de chaleur et des champs de vitesse.
- ✗ Pas de caractérisation du champ de température pour un jet non-isotherme.
- ✗ Simulations numériques instationnaires (LES, DNS) limitées à $Re_D = 20\,000$.
- ✗ Pas de consensus sur les mécanismes à l'origine du second maximum.

Sélection d'une configuration dans le cadre du PRF "JET" de l'Onera (2012-2015)

T_j	130°C
T_e	25°C
Re_D	60 000
H/D	3

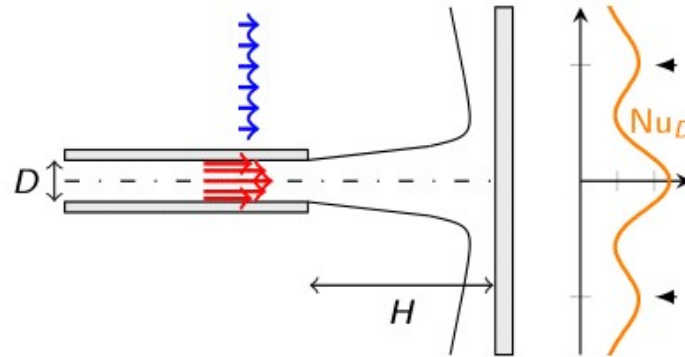


- Jet rond **chauffé** issu d'une **conduite pleinement développée** à un **nombre de Reynolds élevé** et une **faible distance d'impact**.
- **Second maximum** dans la distribution des échanges pariétaux.

Contexte et objectifs (3)

► Objectifs

T_j	130°C
T_e	25°C
Re_D	60 000
H/D	3



Conditions limites

① **Générer une base de données expérimentale**

- Aérodynamique et thermique.
- Échanges pariétaux.

② **Reproduire la configuration à l'aide de simulations numériques**

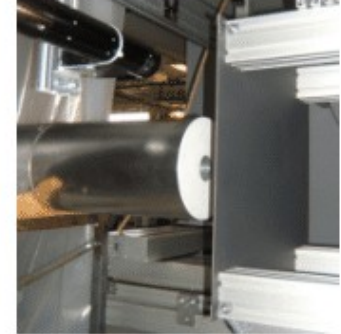
- Évaluer plusieurs niveaux de modélisations :
 - RANS
 - LES
- Mieux comprendre les **mécanismes** associés au second maximum.

Validation

Plan

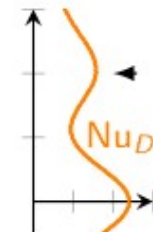
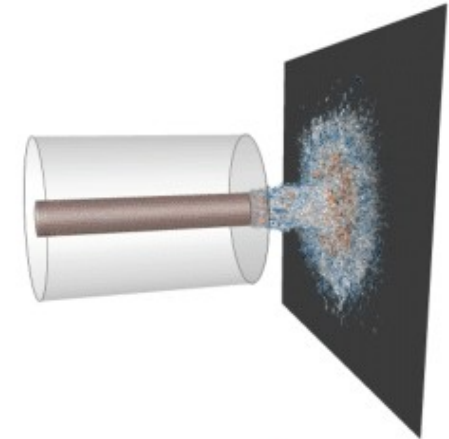
Grenson et al, IJHMT,
102, 801–815 (2016)

- ① Caractérisation expérimentale
 - Sélection d'une métrologie
 - Caractérisation statistique
 - Caractérisation topologique
 - Caractérisation fréquentielle



Grenson et al, IJHFF,
68, 348–363 (2017)

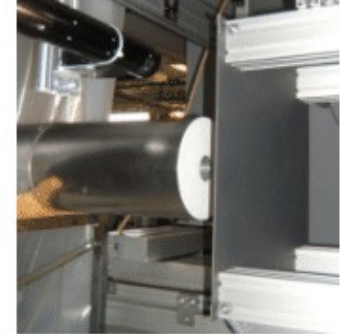
- ② Simulations LES
 - Mise en place
 - Validation statistique
 - Validation topologique
 - Validation fréquentielle
- ③ Analyse du second maximum
- ④ Conclusions et perspectives



Plan

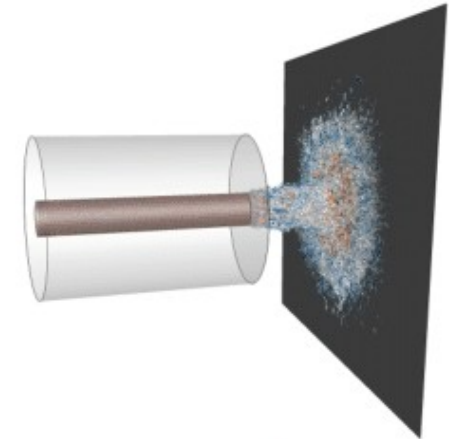
① Caractérisation expérimentale

- Sélection d'une métrologie
- Caractérisation statistique
- Caractérisation topologique
- Caractérisation fréquentielle

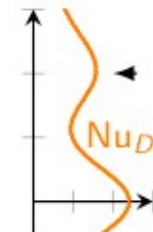


② Simulations LES

- Mise en place
- Validation statistique
- Validation topologique
- Validation fréquentielle



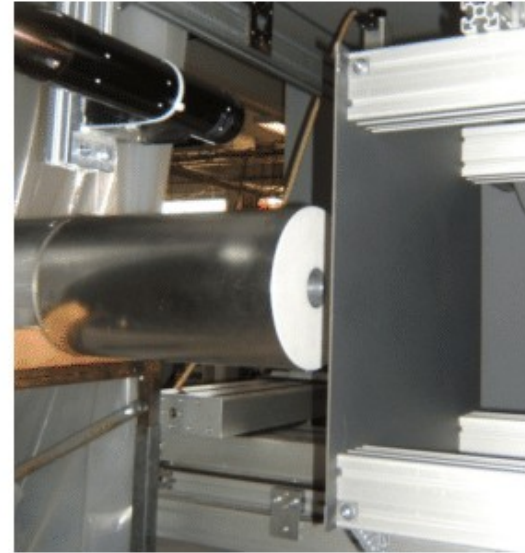
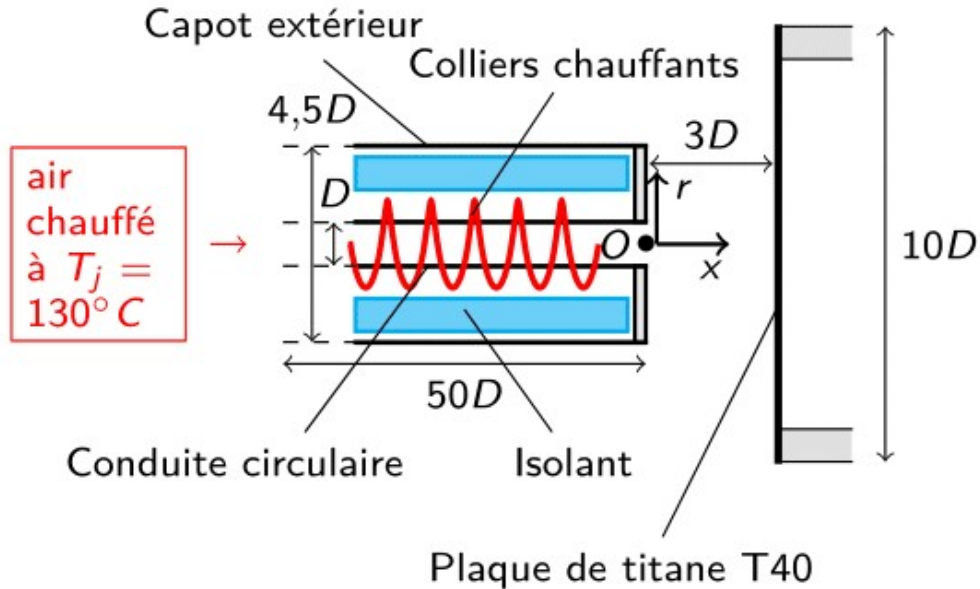
③ Analyse du second maximum



④ Conclusions et perspectives

Caractérisation expérimentale (1)

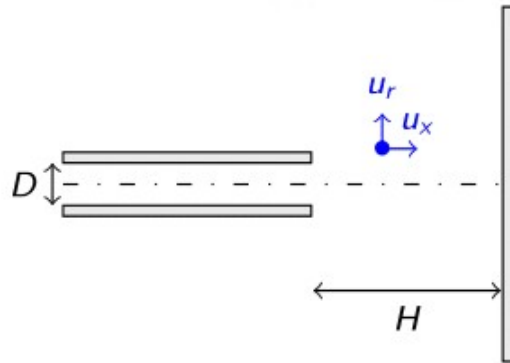
► Banc d'essai Aérothermique



D	60 mm
U_j	25 m/s
H	180 mm

Caractérisation expérimentale (2)

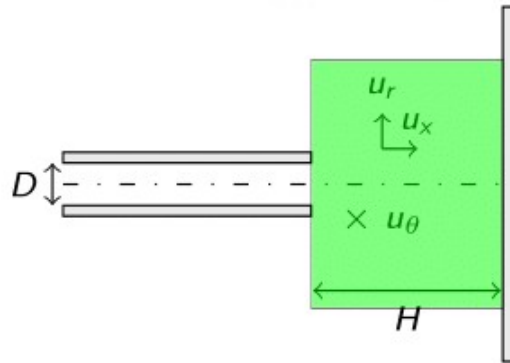
► Métrologie



Technique de mesure	Résolu en espace	Résolu en temps	Grandeurs
LDV		$\times (10 \text{ kHz})$	u_x et u_r

Caractérisation expérimentale (2)

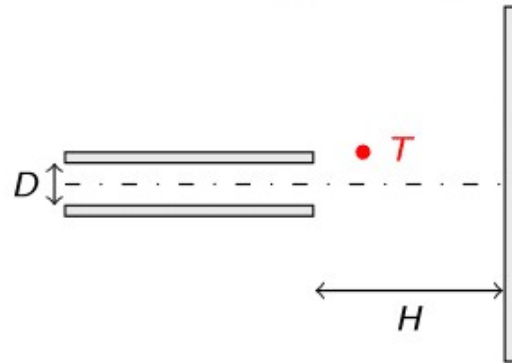
► Métrologie



Technique de mesure	Résolu en espace	Résolu en temps	Grandeurs
LDV		$\times (10 \text{ kHz})$	u_x et u_r
S-PIV	\times		u_x, u_r et u_θ

Caractérisation expérimentale (2)

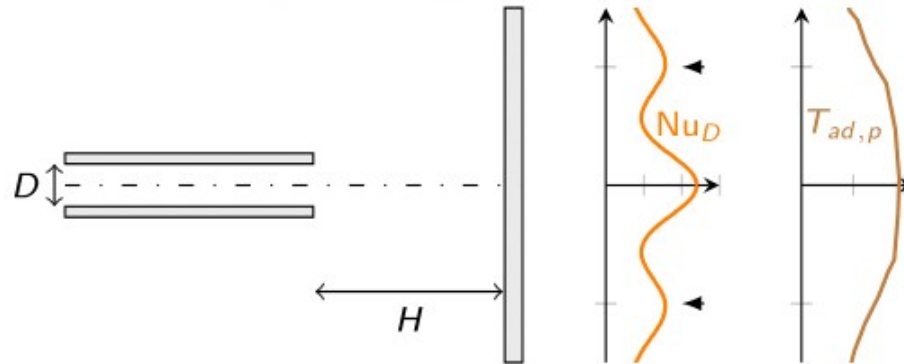
► Métrologie



Technique de mesure	Résolu en espace	Résolu en temps	Grandeurs
LDV		\times (10 kHz)	u_x et u_r
S-PIV	\times		u_x, u_r et u_θ
Fil froid		\times (3 kHz)	T

Caractérisation expérimentale (2)

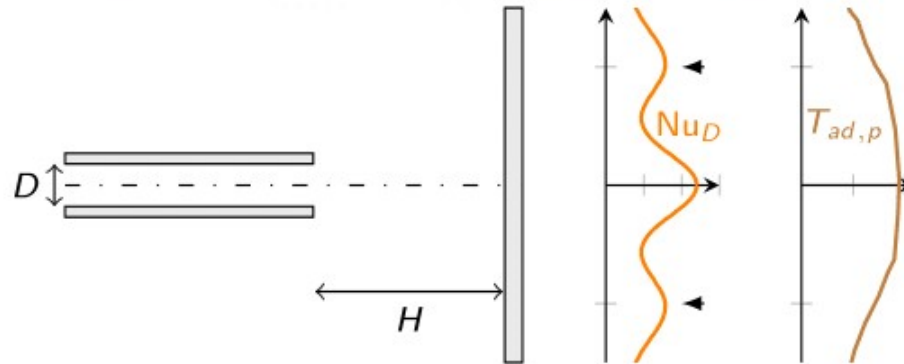
► Métrologie



Technique de mesure	Résolu en espace	Résolu en temps	Grandeurs
LDV		× (10 kHz)	u_x et u_r
S-PIV	×		u_x , u_r et u_θ
Fil froid		×	T
Therm. en face arrière (ThEFA)	×		Nu_D , $T_{ad,p}$

Caractérisation expérimentale (2)

► Métrologie



Technique de mesure	Résolu en espace	Résolu en temps	Grandeurs
LDV		× (10 kHz)	u_x et u_r
S-PIV	×		u_x , u_r et u_θ
Fil froid		×	T
Therm. en face arrière (ThEFA)	×		Nu_D , $T_{ad,p}$

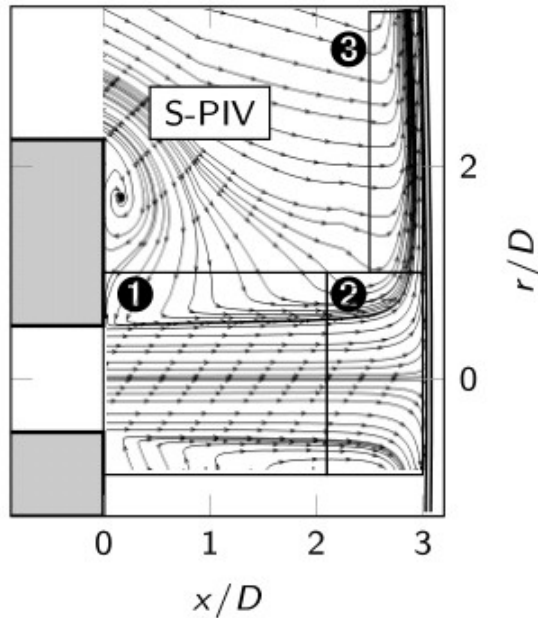
- ▷ Description **aérodynamique** et **thermique**.
- ▷ Mesure complète du **tenseur de Reynolds**.
- ▷ Deux moyens de mesure pour le champ de vitesse.
- ▷ **Complémentarité** des approches : mesures résolues en temps et en espace du champ de vitesse.

✎ Caractérisation statistique, topologique et fréquentielle.

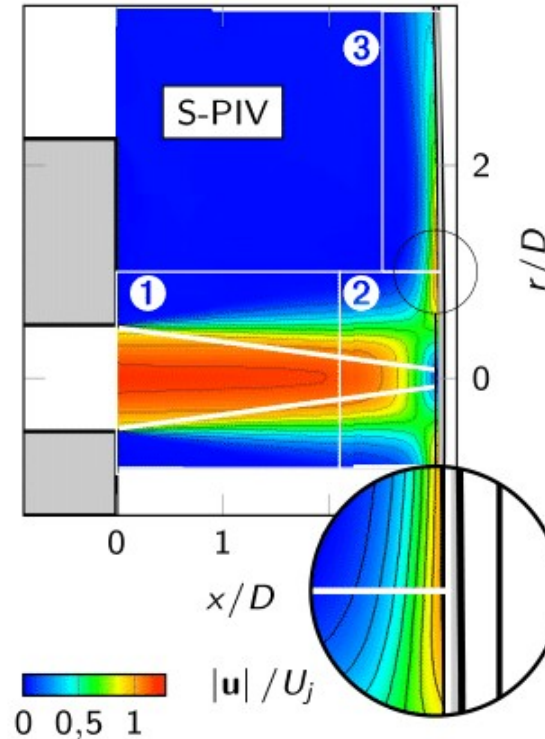
Caractérisation expérimentale (3)

► Caractérisation statistique : champs moyens

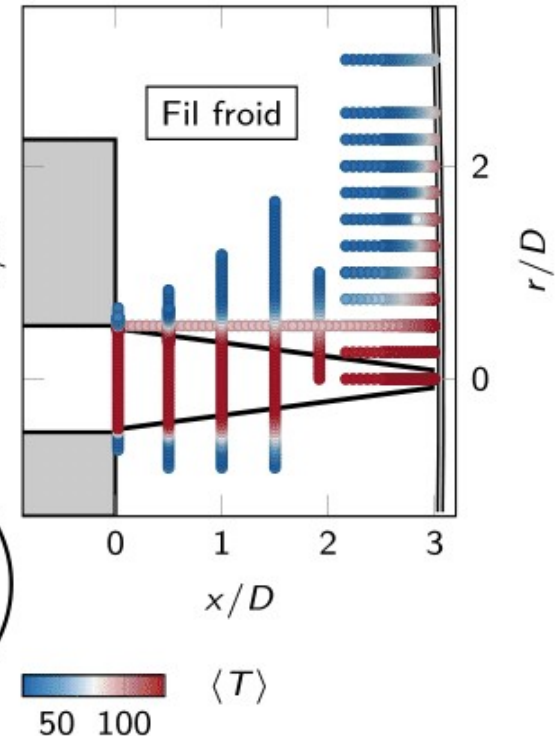
Lignes de courant



Norme de la vitesse



Température

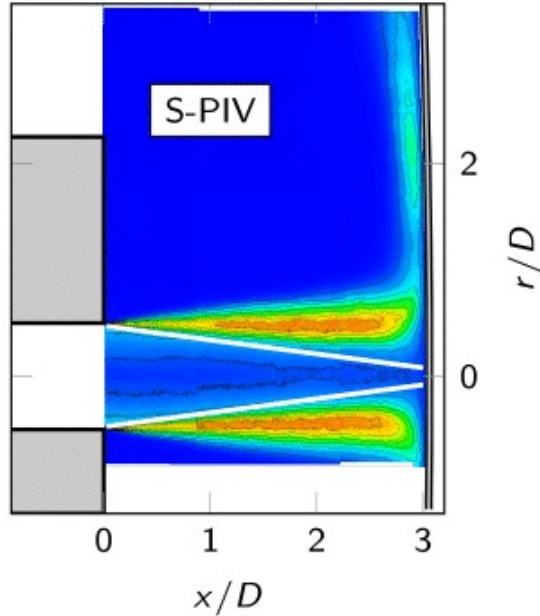


- ▷ ① Jet libre ② Région d'impact ③ Jet pariétal
- ▷ Vitesse radiale la plus élevée à $r/D = 1$
- ▷ Paroi d'impact située dans le **noyau** du jet

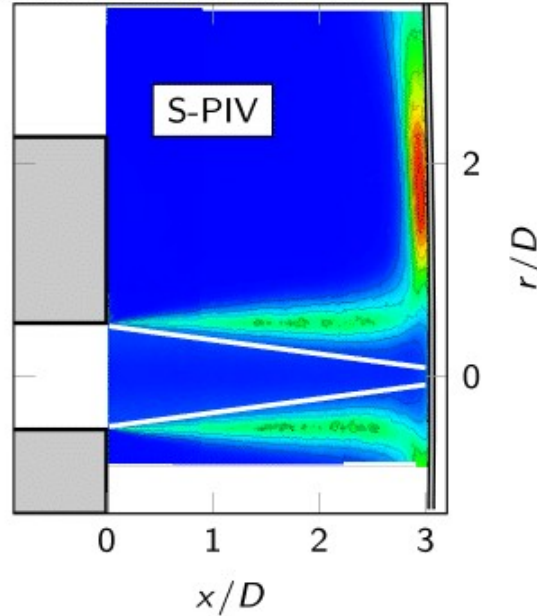
Caractérisation expérimentale (4)

► Caractérisation statistique : champs fluctuants

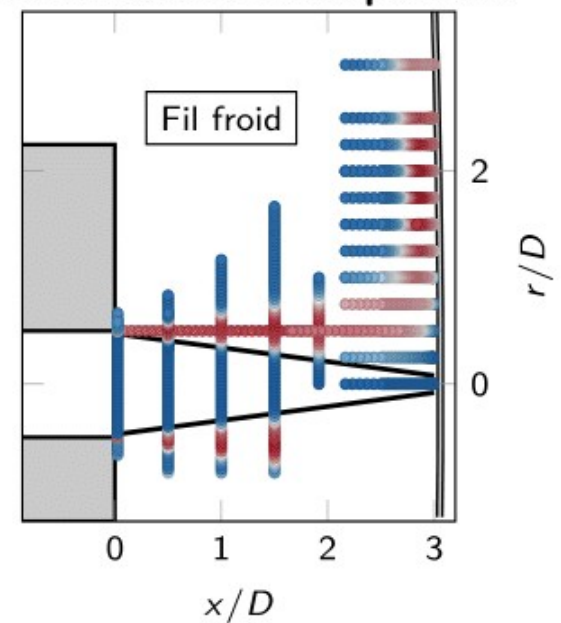
Fluctuations axiales



Fluctuations radiales



Fluctuations de température



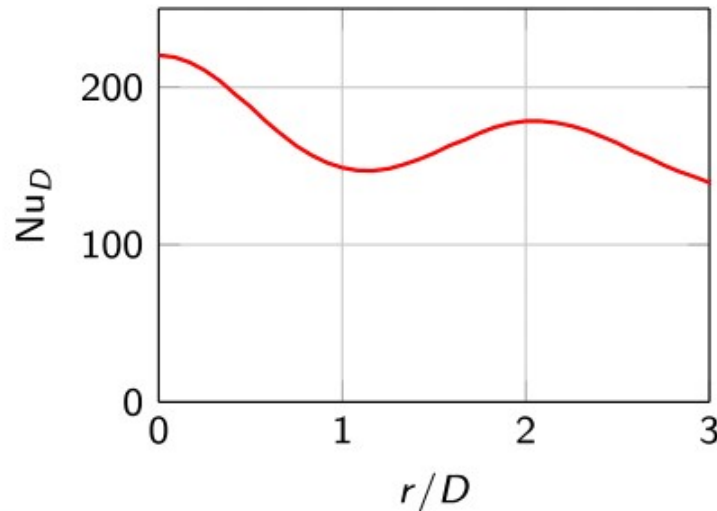
- Développement des **couches de mélange**.
- Faible niveau des fluctuations (aérodynamiques and thermiques) dans le **noyau** du jet.
- Fluctuations de vitesse (axiale et radiale) et de température les plus importantes vers $r/D = 2$.

Caractérisation expérimentale (5)

► Caractérisation statistique : échanges thermiques

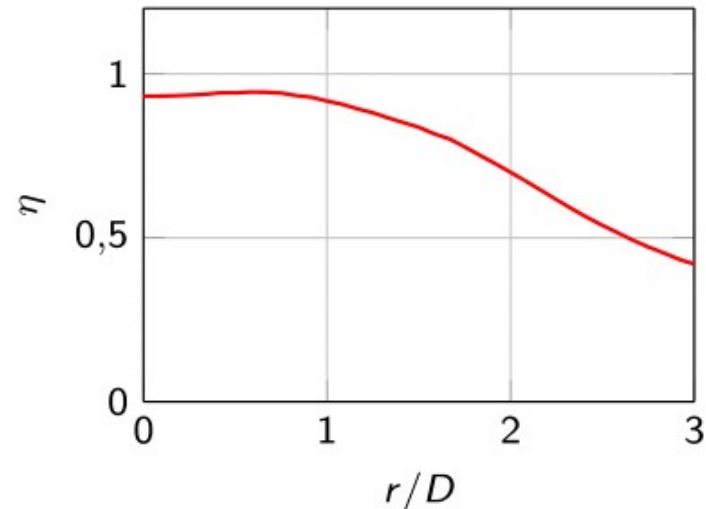
Distribution du nombre de Nusselt Nu_D

$$Nu_D = \frac{hD}{\lambda_f}$$



Distribution de l'efficacité

$$\eta = \frac{T_{ad,p} - T_e}{T_j - T_e}$$



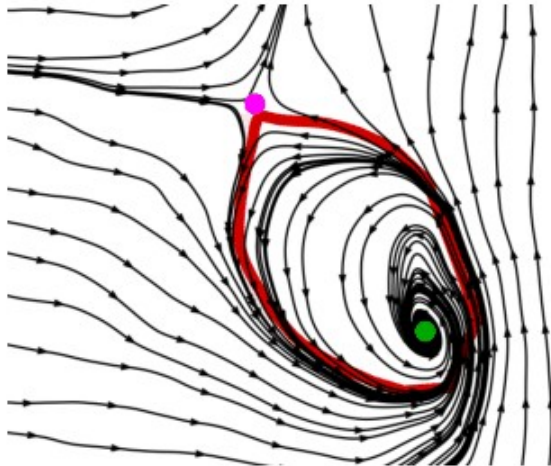
- Premier maximum au point d'arrêt.
- Second maximum vers $r/D = 2$.
- "Plateau" de η proche de 1 dans la région d'impact $r/D = 0$ et $r/D = 1 \Rightarrow$ la plaque localisée avant la fin du noyau du jet.

Caractérisation expérimentale (6)

► Caractérisation topologique

Algorithme de détection de structures

- 5000 instantanés S-PIV : lignes de courant dans le plan médian.

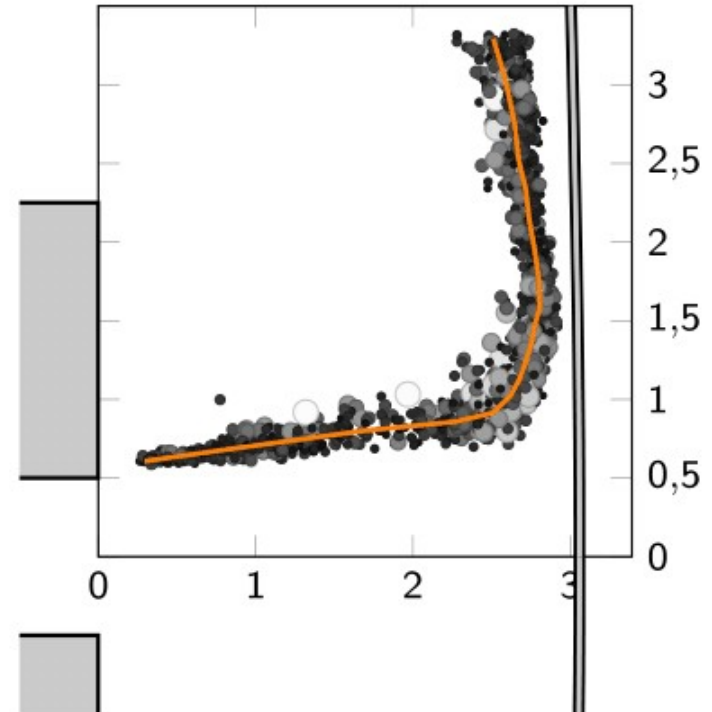


- Algorithme de détection des régions tourbillonnaires de Debien et al. (2016) :

- Région tourbillonnaire = courbe fermée entourant un foyer, passant par un point selle.
- Avantage : ne dépend pas d'un niveau arbitraire.

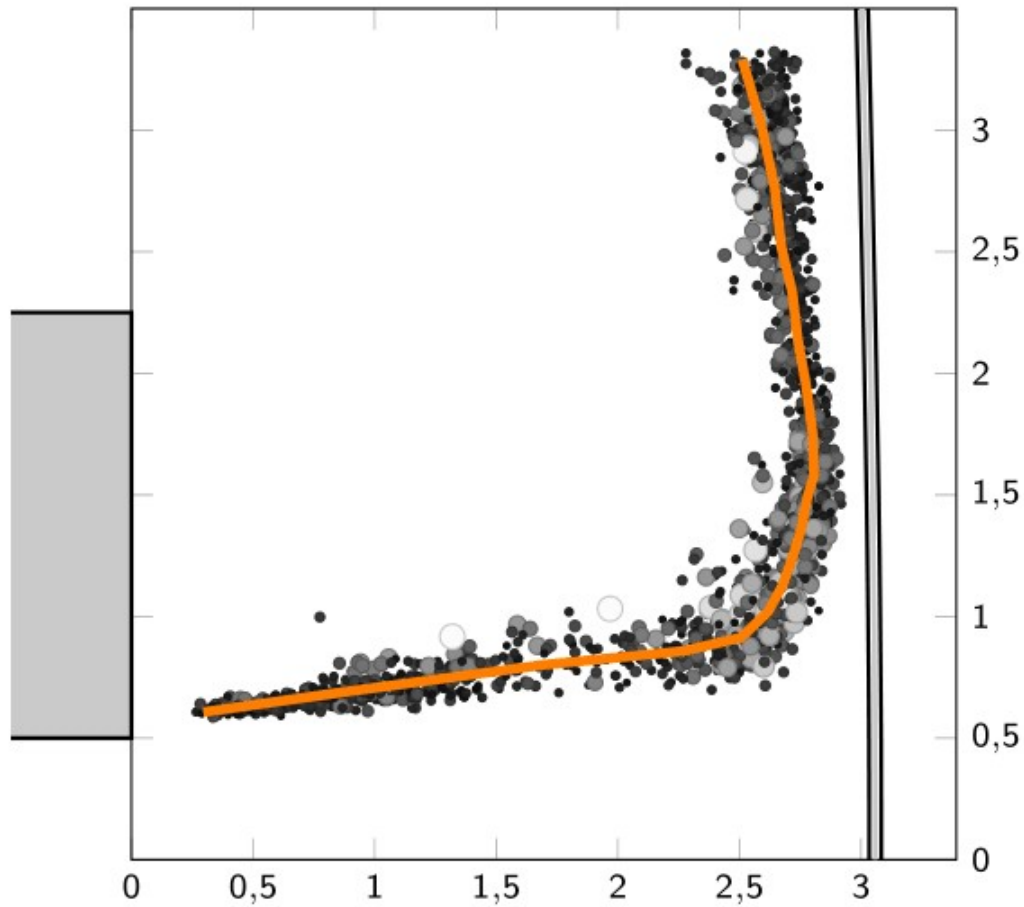
Cartographie topologique

- 1500 plus grandes structures détectées.

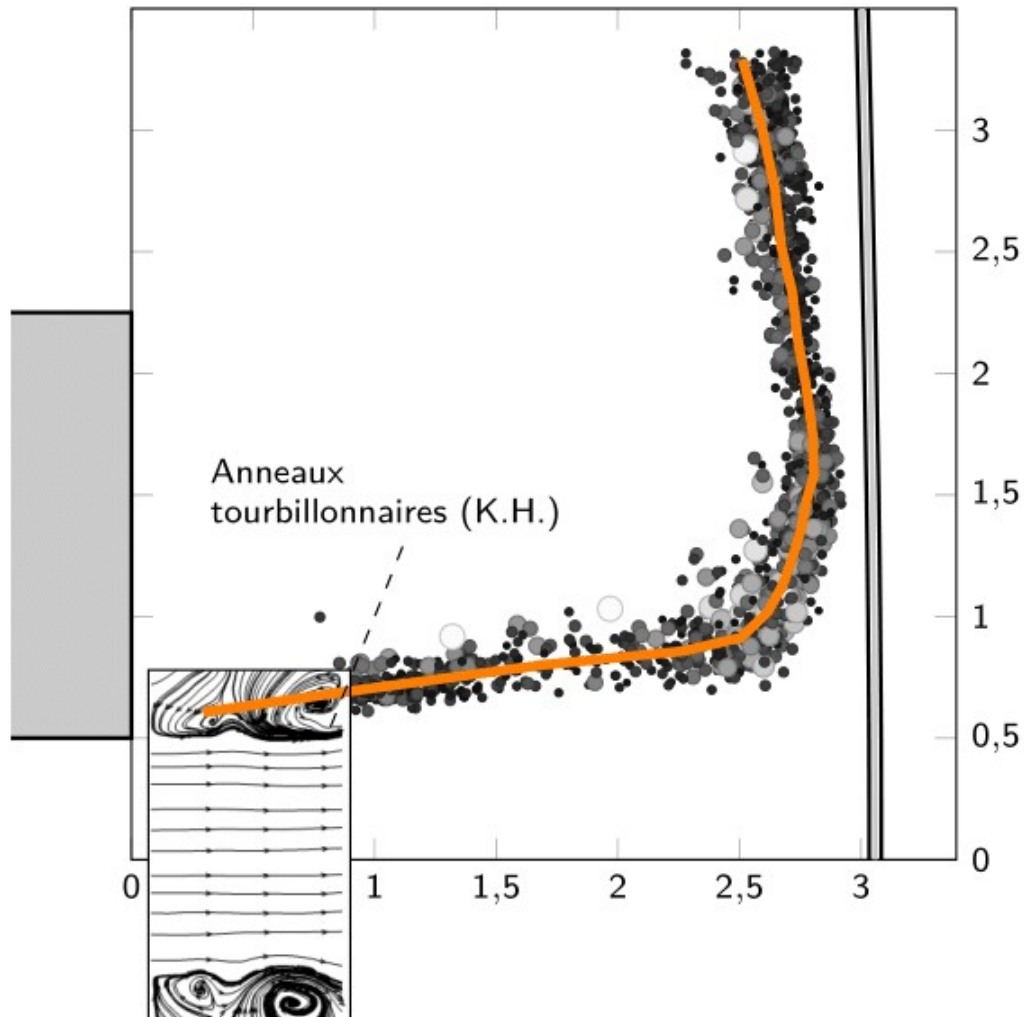


► Ligne moyenne des régions tourbillonnaires.

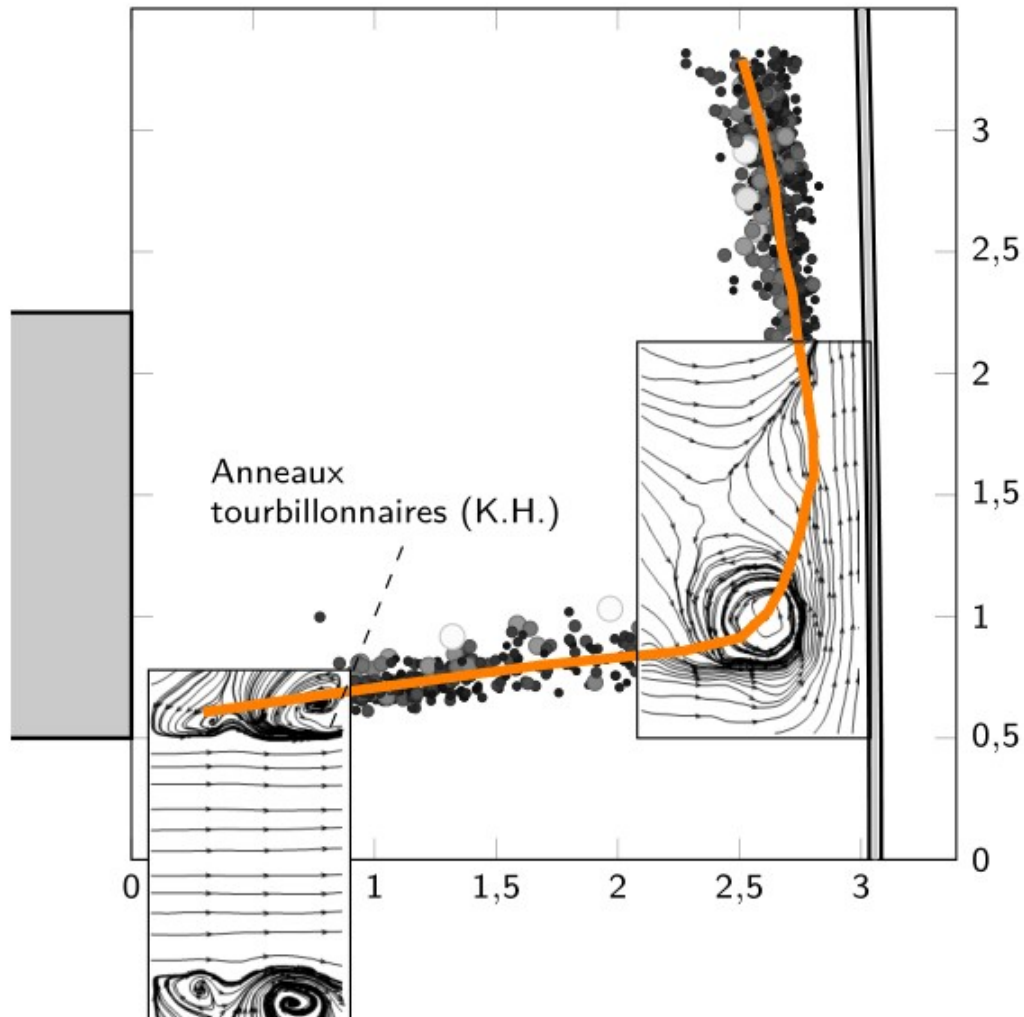
Caractérisation expérimentale (6)



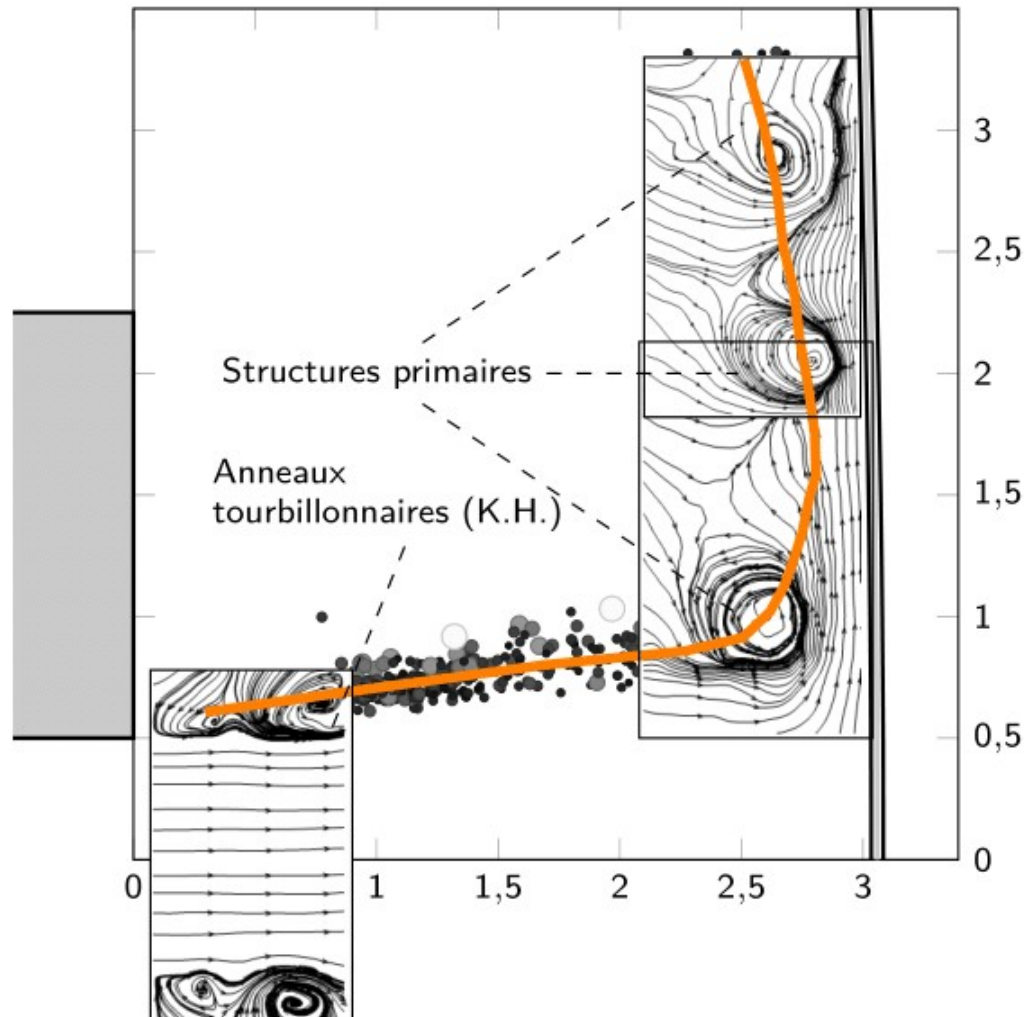
Caractérisation expérimentale (6)



Caractérisation expérimentale (6)

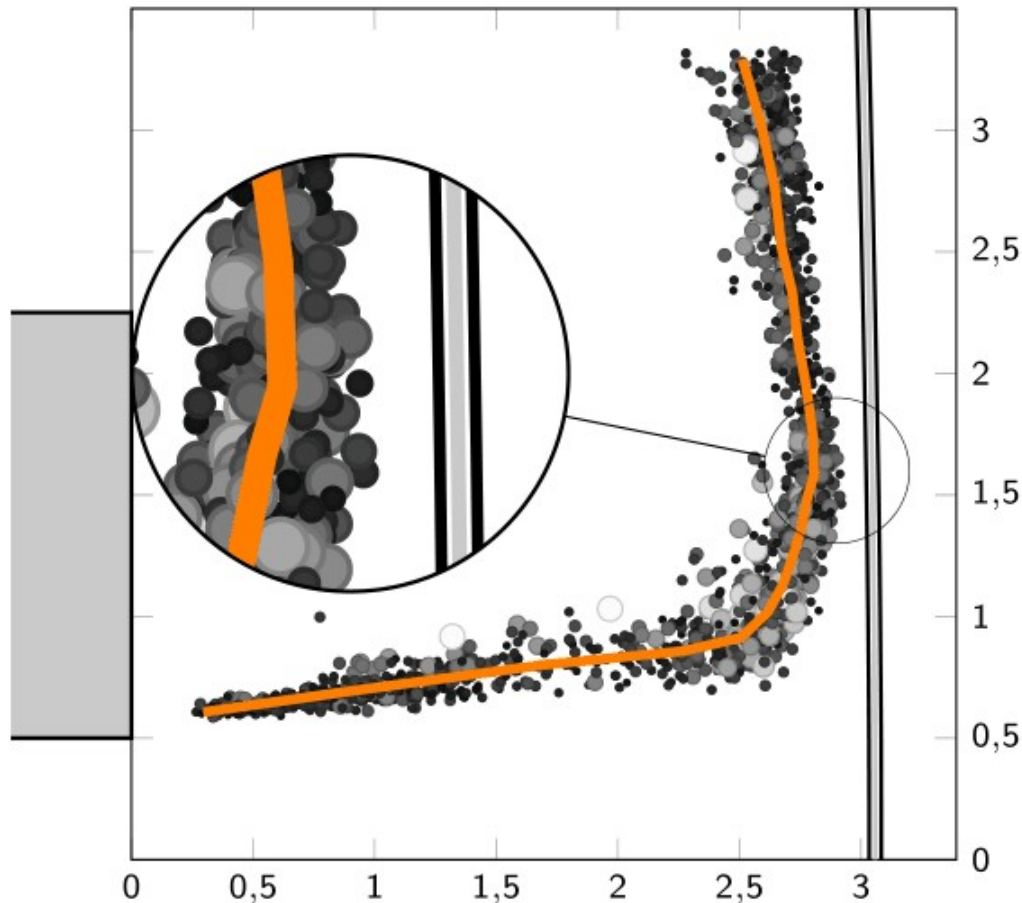


Caractérisation expérimentale (6)



- Structures primaires observées expérimentalement (Tummers et al., 2007 et Roux et al., 2013) pour des nombres de Reynolds intermédiaires ($Re_D \simeq 20\,000$).

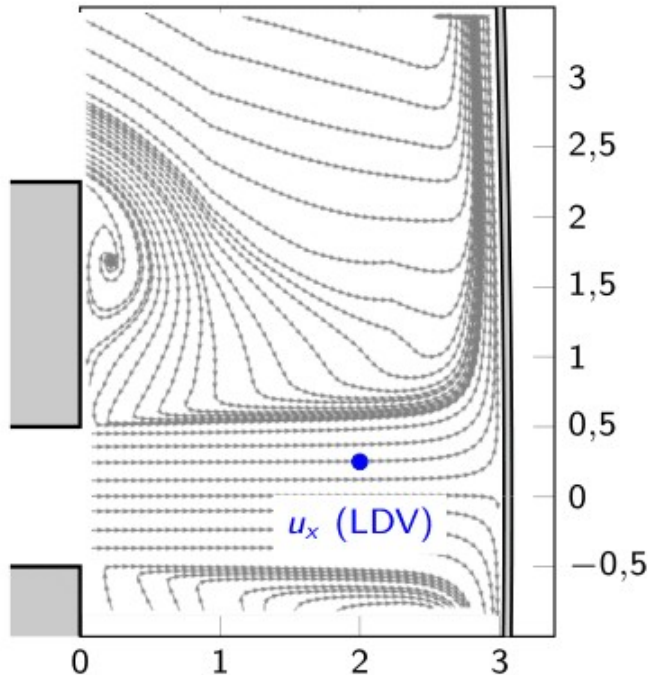
Caractérisation expérimentale (6)



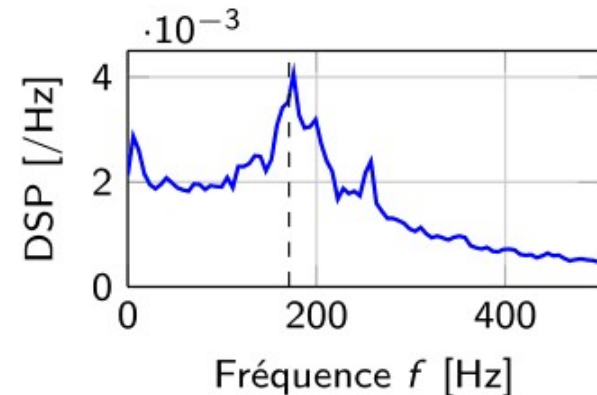
- Structures primaires observées expérimentalement (Tummers et al., 2007 et Roux et al., 2013) pour des nombres de Reynolds intermédiaires ($Re_D \simeq 20\,000$).
- Structures primaires **les plus proches** de la paroi vers $r/D = 1,6$.

Caractérisation expérimentale (7)

► Caractérisation fréquentielle



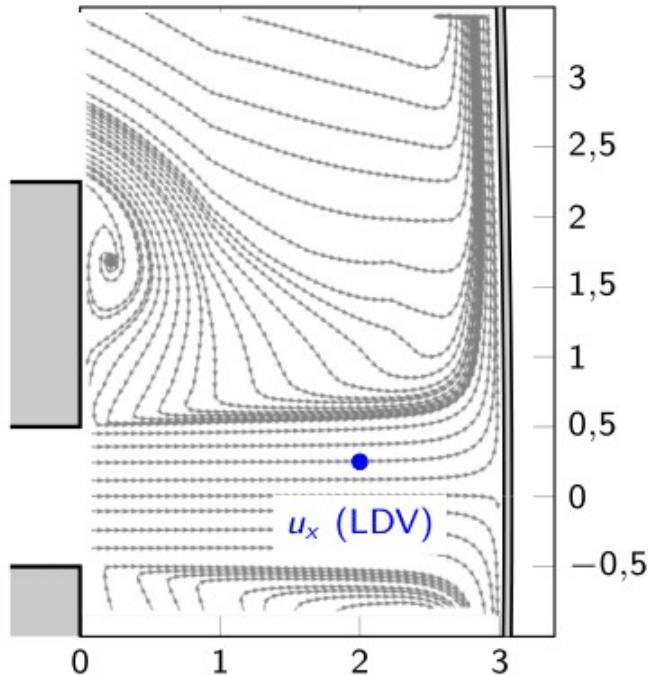
- Densité spectrale de puissance (DSP) de u_x pour un point dans la couche de mélange.



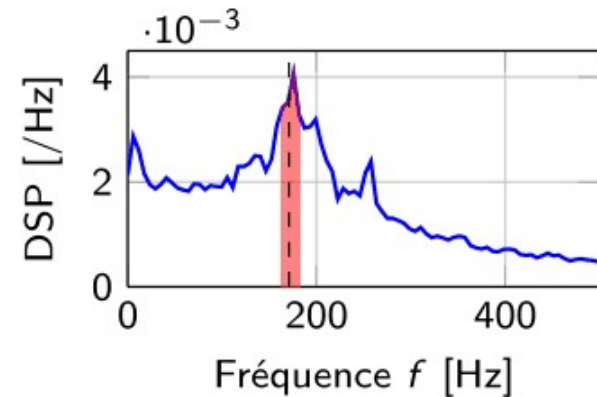
- Émergence d'une **fréquence dominante** à $f = 170$ Hz correspondant à un nombre de Strouhal $St_D = U_j f / D = 0,4$ associé au **mode colonne** du jet libre.

Caractérisation expérimentale (7)

► Caractérisation fréquentielle



- Densité spectrale de puissance (DSP) de u_x pour un point dans la couche de mélange.

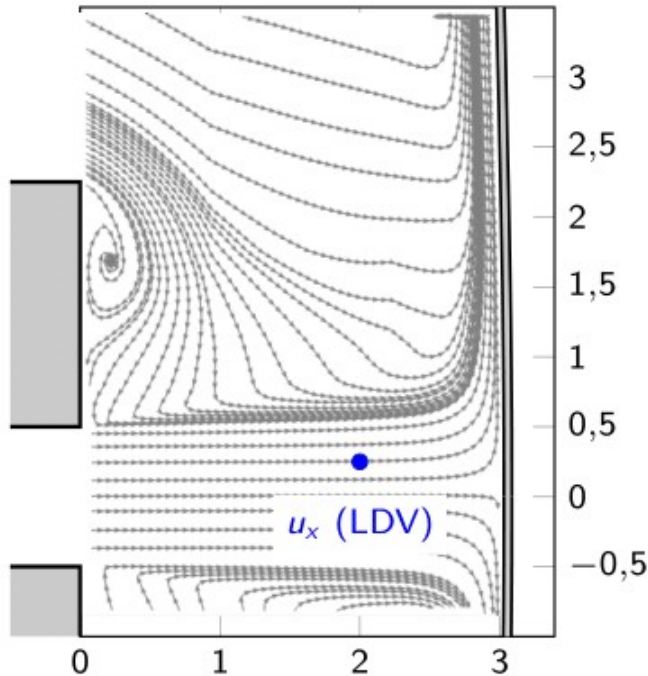


- Définition d'un critère pour mettre en évidence les régions d'apparition de ce pic :

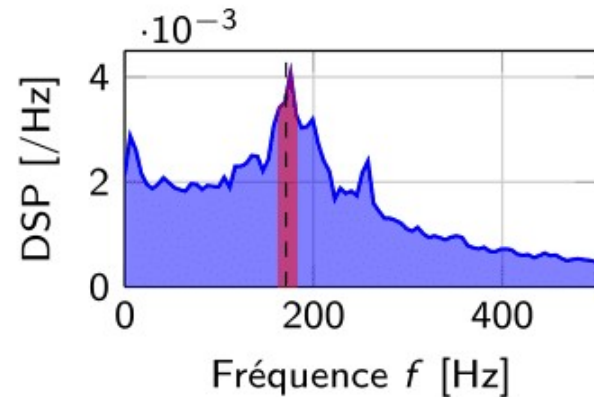
$$P = \frac{\text{DSP moy. du pic}}{\text{DSP moy. du signal}}$$

Caractérisation expérimentale (7)

► Caractérisation fréquentielle



- Densité spectrale de puissance (DSP) de u_x pour un point dans la couche de mélange.

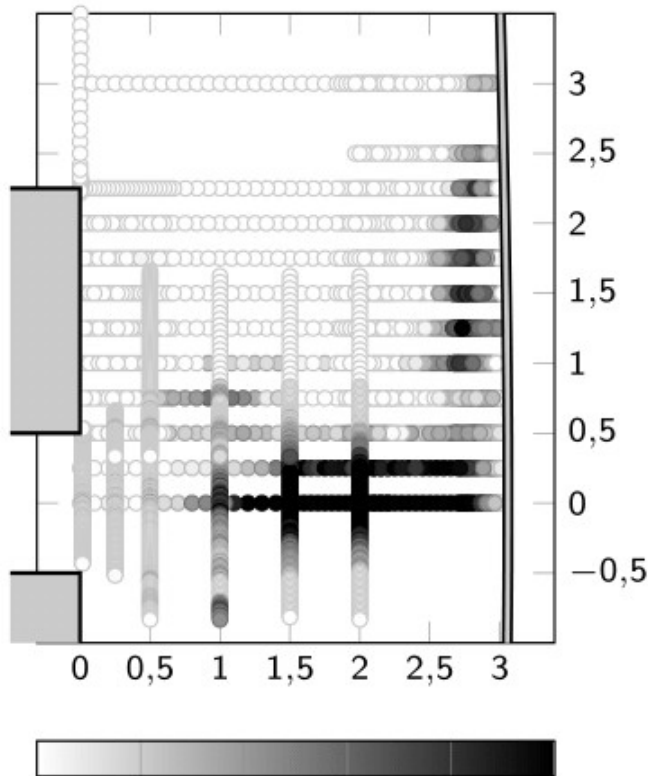


- Définition d'un critère pour mettre en évidence les régions d'apparition de ce pic :

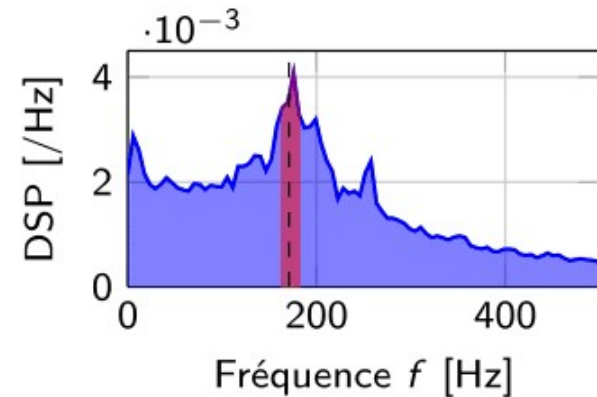
$$P = \frac{\text{DSP moy. du pic}}{\text{DSP moy. du signal}}$$

Caractérisation expérimentale (7)

► Caractérisation fréquentielle



- Densité spectrale de puissance (DSP) de u_x pour un point dans la couche de mélange.

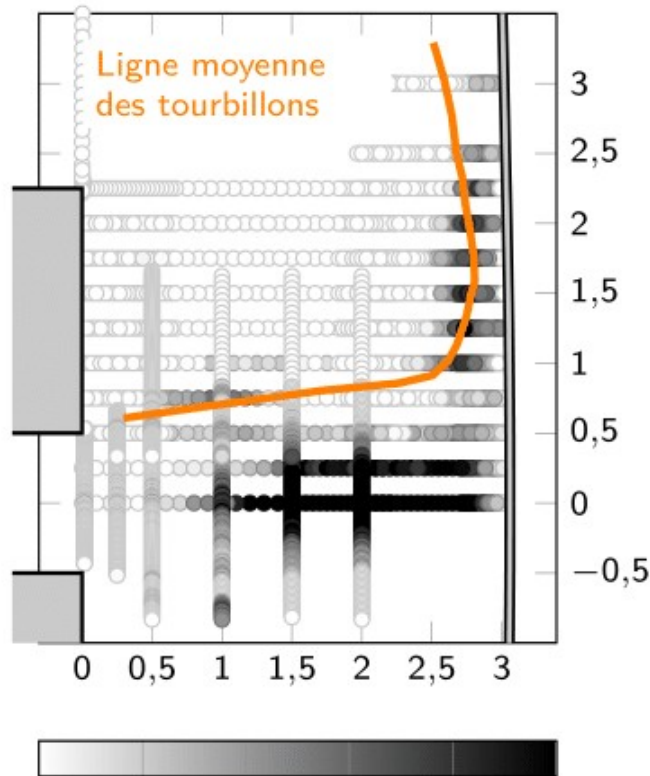


- Définition d'un critère pour mettre en évidence les régions d'apparition de ce pic :

$$P = \frac{\text{DSP moy. du pic}}{\text{DSP moy. du signal}}$$

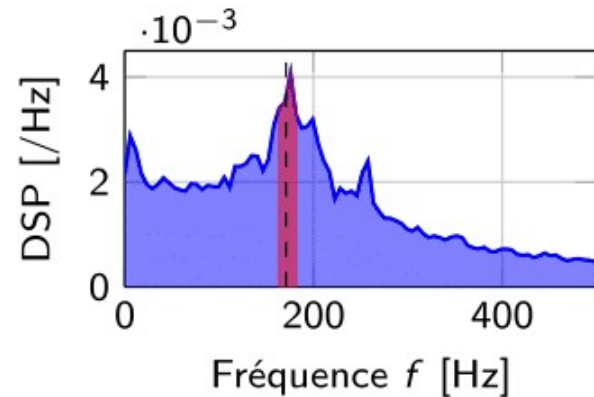
Caractérisation expérimentale (7)

► Caractérisation fréquentielle



► Fréquence de passage des structures primaires = mode colonne ($St_D = 0,4$).

- Densité spectrale de puissance (DSP) de u_x pour un point dans la couche de mélange.



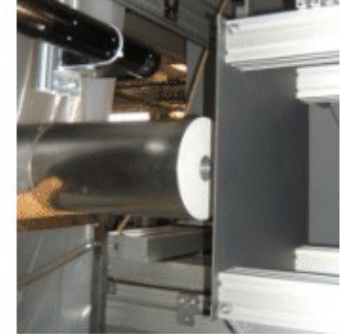
- Définition d'un critère pour mettre en évidence les régions d'apparition de ce pic :

$$P = \frac{\text{DSP moy. du pic}}{\text{DSP moy. du signal}}$$

Plan

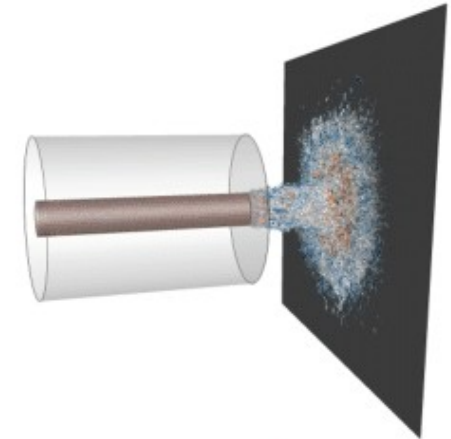
① Caractérisation expérimentale

- Sélection d'une métrologie
- Caractérisation statistique
- Caractérisation topologique
- Caractérisation fréquentielle

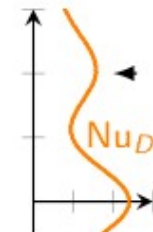


② Simulations LES

- Mise en place
- Validation statistique
- Validation topologique
- Validation fréquentielle



③ Analyse du second maximum



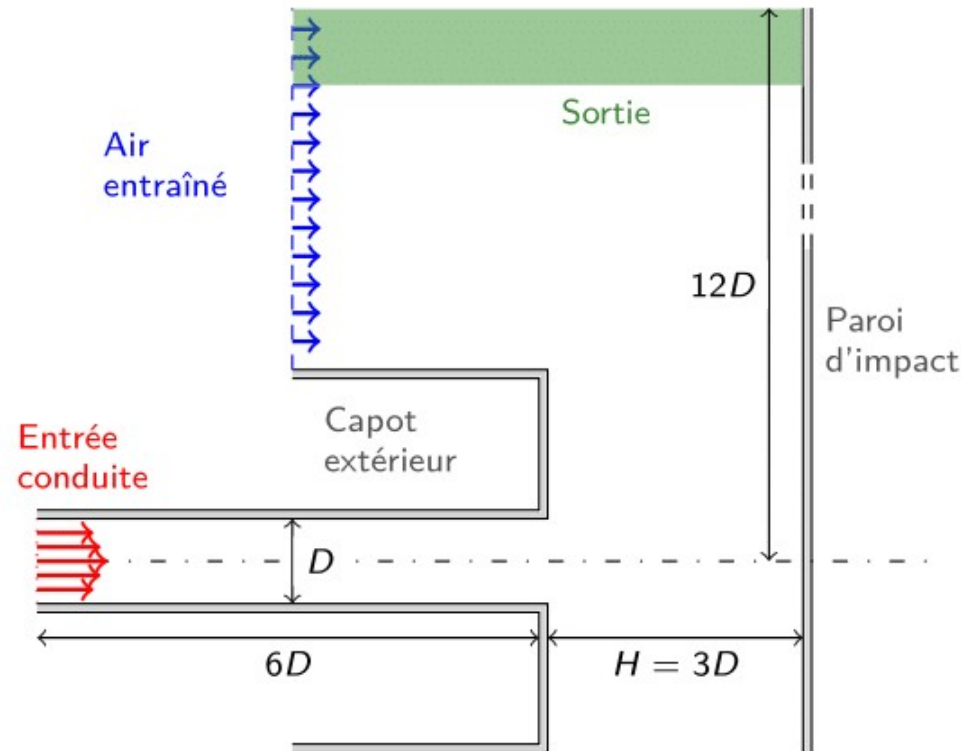
④ Conclusions et perspectives

Simulations LES (1)

► Domaine de calcul

Configuration 3D (plan médian)

- ▷ **Entrée conduite**
Profil de vitesse moyen (LDV) + perturbations
- ▷ **Air entraîné**
Profil de vitesse moyen (LDV)
- ▷ **Paroi d'impact**
Isotherme ($T_p = 25^\circ\text{C}$)
- ▷ **Capot extérieur**
Paroi adiabatique.
- ▷ **Sortie**
Condition de sortie non-réfléchissante + zone éponge.



Simulations LES (2)

► Paramètres numériques

Solveur

- ▷ Solveur **elsA** : solveur volumes-finis structuré multi-bloc co-développé par l'Onera et le Cerfacs.
- ▷ **Schémas compacts VF** de Fosso et al. (2011) : au moins d'**ordre 5** → une structure discrétisée sur plus de 6 cellules est bien résolue. Stabilité du schéma garantie par un filtrage des longueurs d'ondes mal résolues (Visbal et al., 2008)
- ▷ Intégration en temps **explicite** à l'aide d'un schéma de Runge-Kutta (RK4) à quatre pas : $\Delta t = 3 \times 10^{-5} D/U_j$ → choisi pour garantir la stabilité numérique ($CFL = 1,4$) sur la base de la plus petite cellule du maillage.
- ▷ Pas de modèle de sous-maille explicite : utilisation du **filtre associé au schéma numérique** comme **filtre explicite LES** dissipant l'énergie des échelles non-résolues (Le Bras, 2016).
- ▷ Temps physique simulé $t = 37D/U_j$ correspondant à **16 temps caractéristiques** (mode colonne) → statistiques convergées.

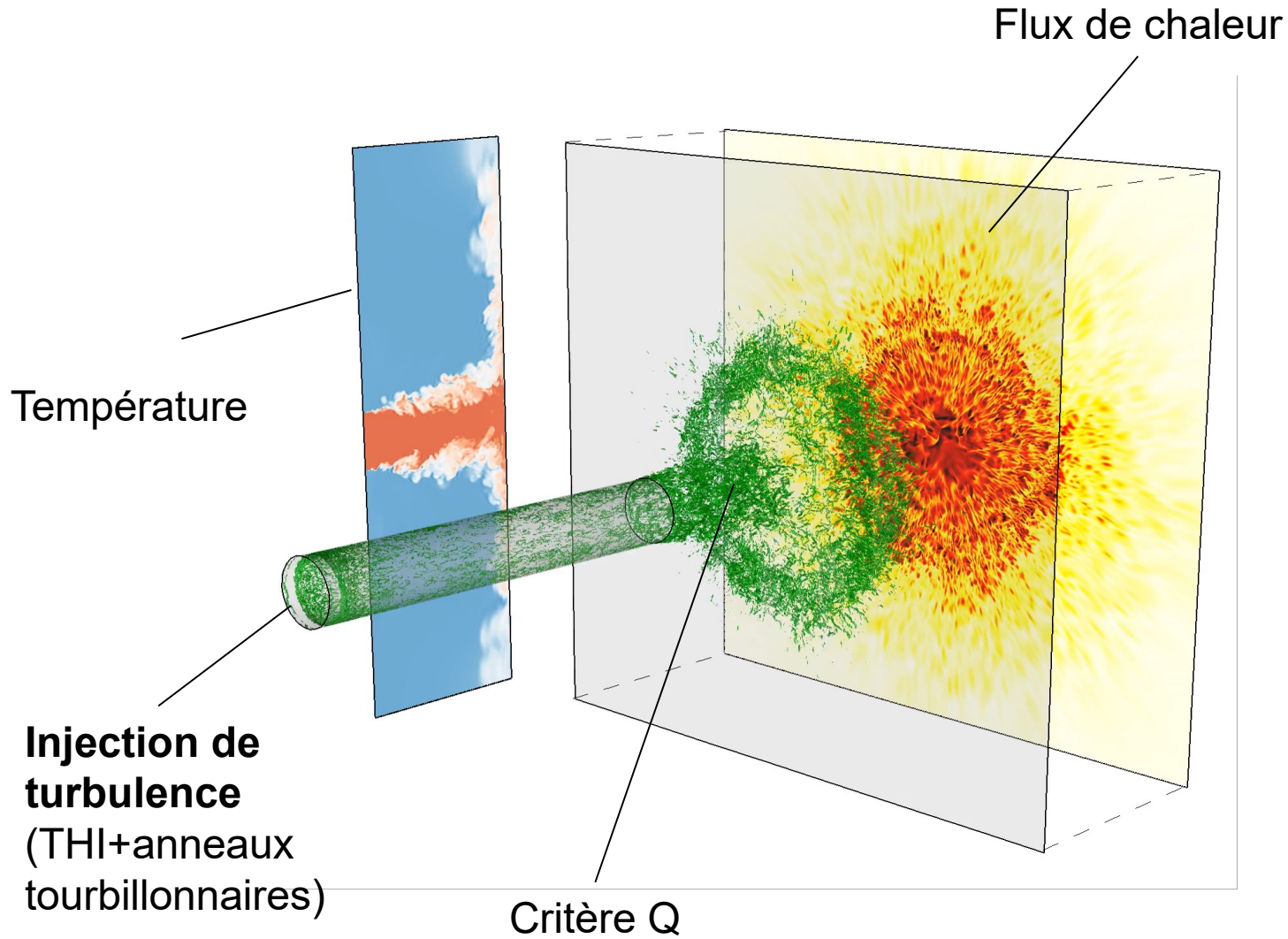
Maillage

- ▷ Respect des critères de **LES résolue à la paroi** de Piomelli et Chasnov (1998) : $\Delta x^+ = 1,7$, $\Delta r^+ = 20$ et $(r\Delta\theta)^+ = 20$
- ▷ Taille totale du maillage : 350×10^6 cellules.

☛ Temps de restitution : 55 jours (1152 processeurs sur supercalculateur Occigen/GENCI).

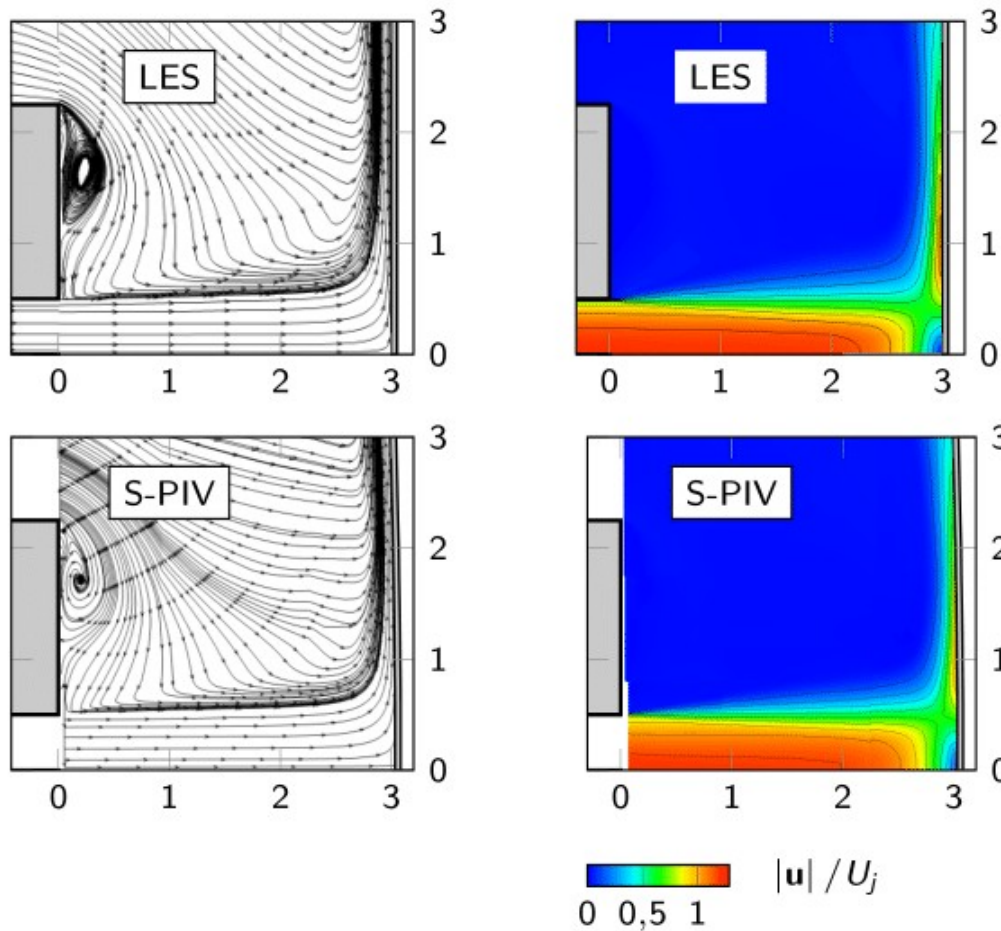
Simulations LES (3)

► Structuration de l'écoulement



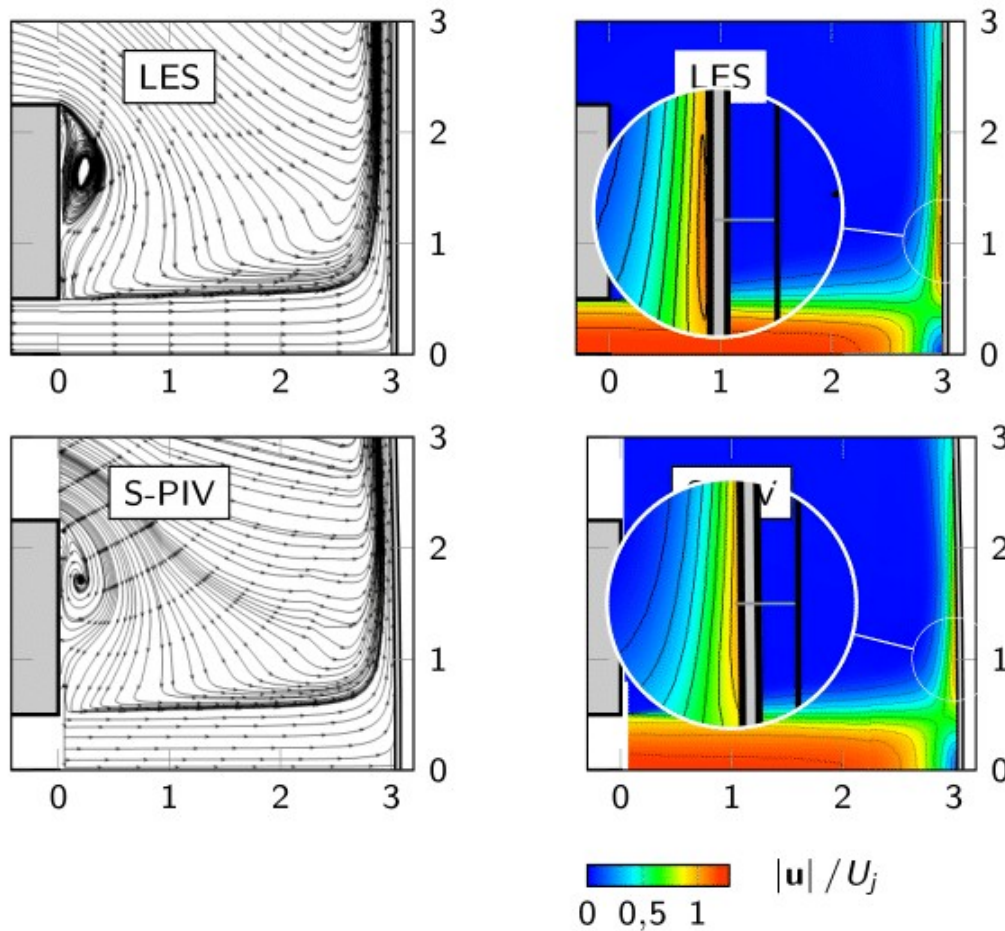
Simulations LES (4)

► Validation statistique : champs moyens et fluctuants



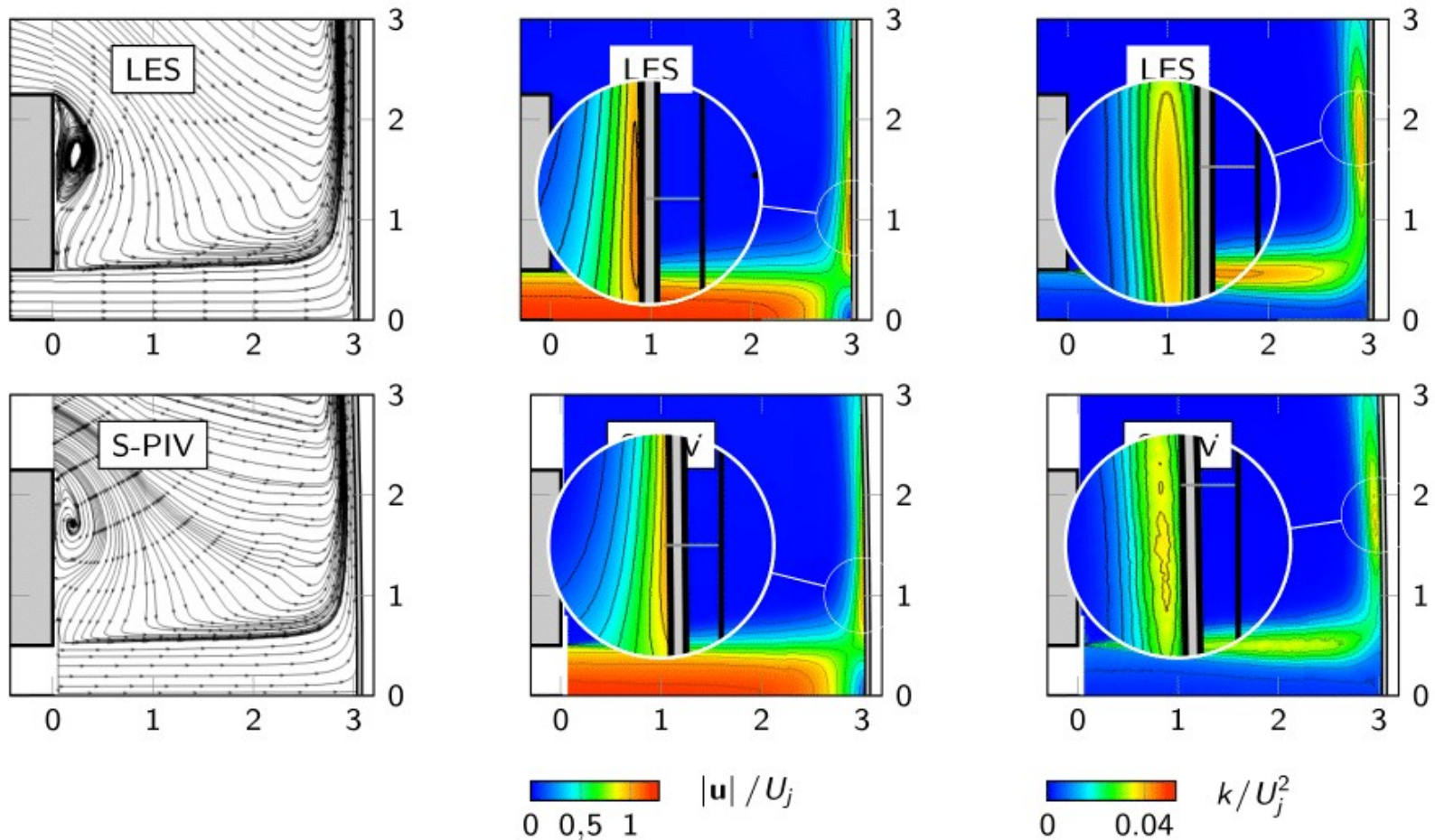
Simulations LES (4)

► Validation statistique : champs moyens et fluctuants



Simulations LES (4)

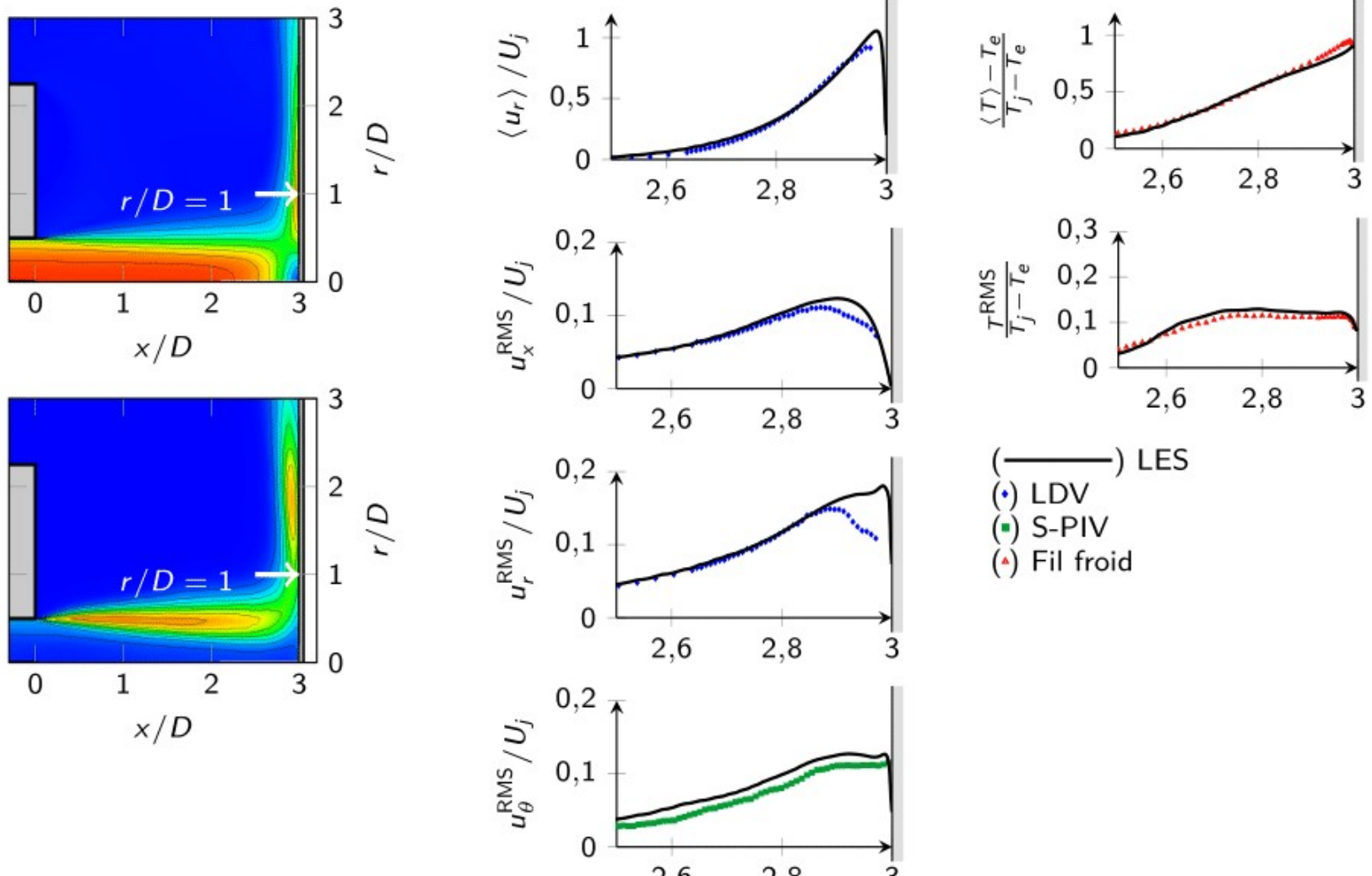
► Validation statistique : champs moyens et fluctuants



☞ Surestimation des fluctuations dans la couche de mélange du jet libre \Leftarrow onde de pression parasite dans la conduite.

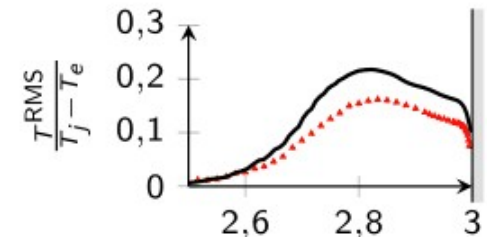
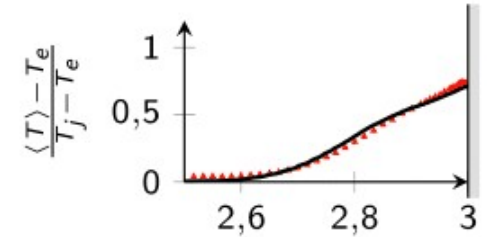
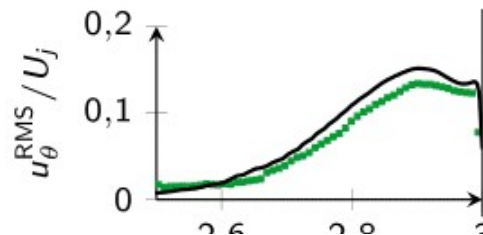
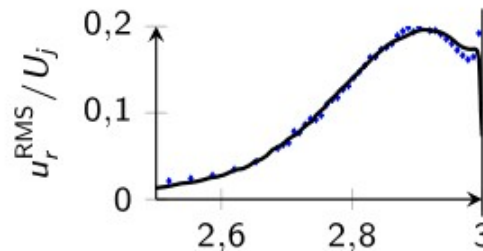
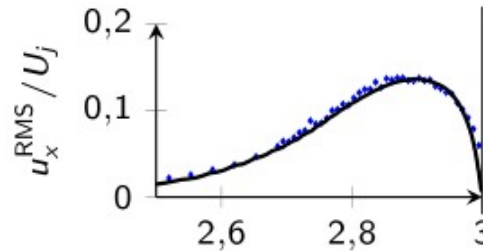
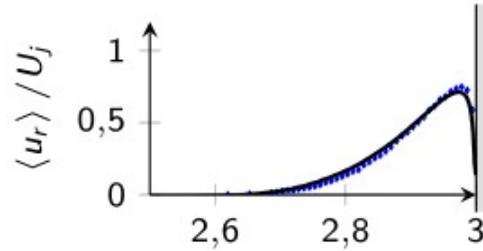
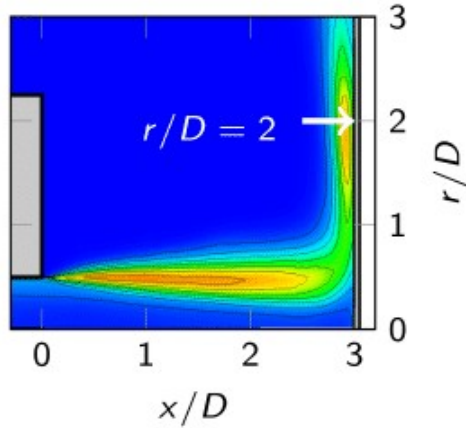
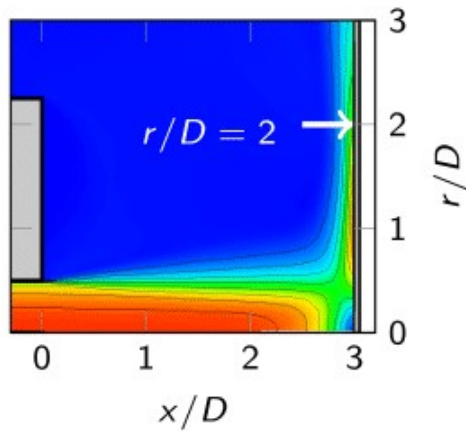
Simulations LES (5)

► Validation statistique : Profils moyens et fluctuants



Simulations LES (5)

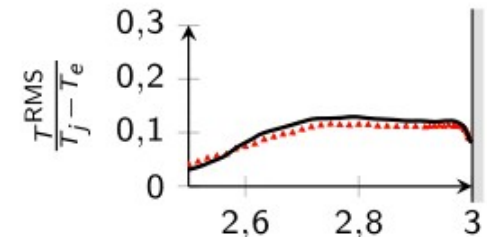
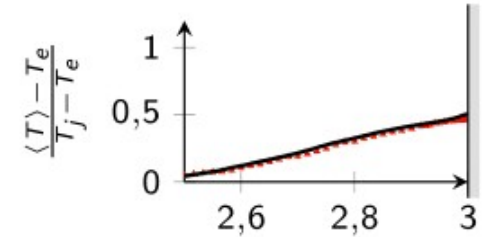
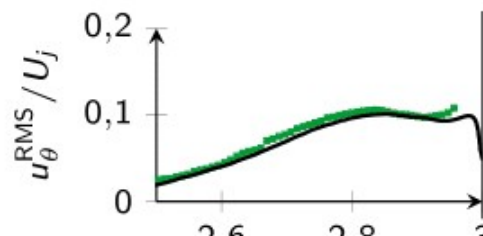
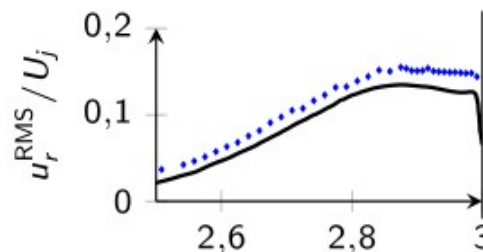
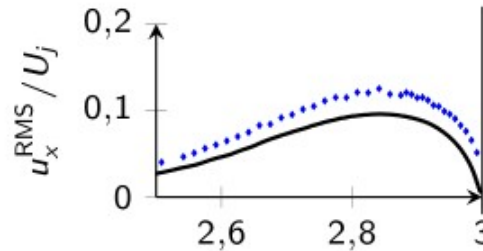
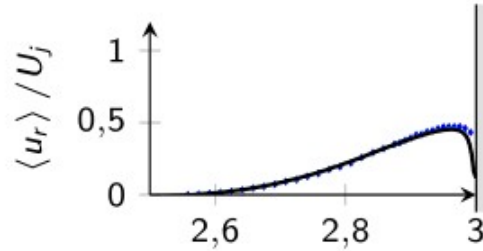
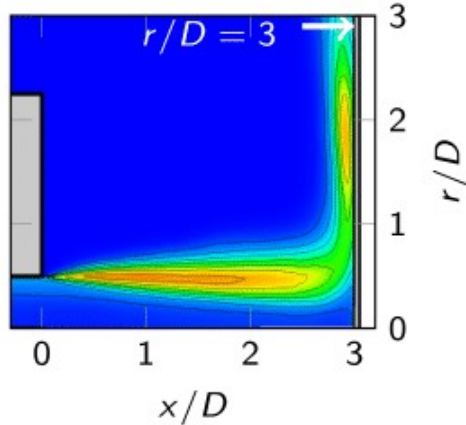
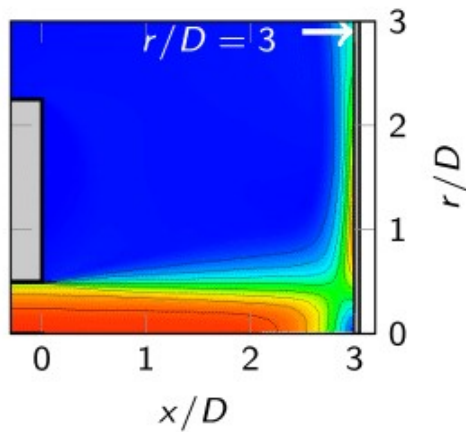
► Validation statistique : Profils moyens et fluctuants



(—) LES
 (•) LDV
 (■) S-PIV
 (▲) Fil froid

Simulations LES (5)

► Validation statistique : Profils moyens et fluctuants



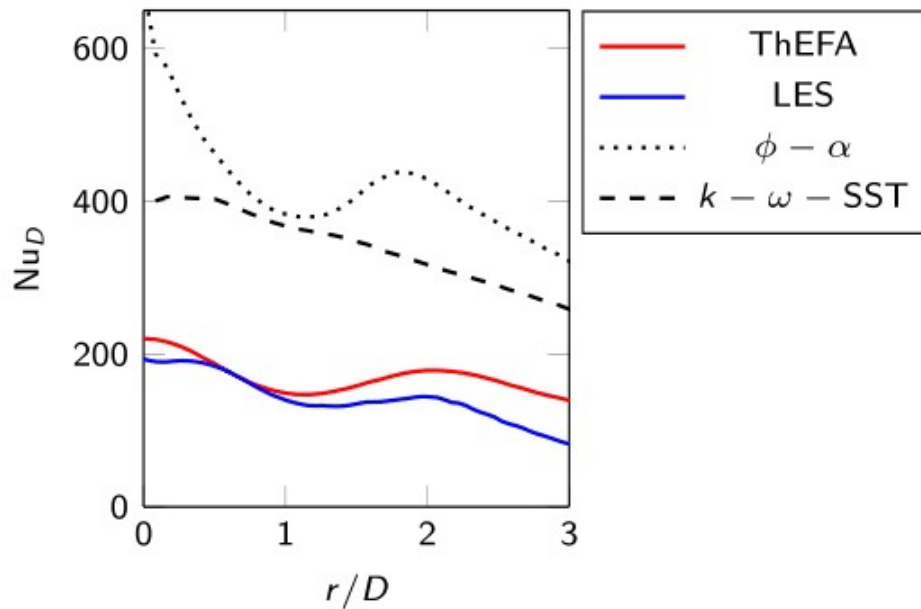
(—) LES
 (•) LDV
 (■) S-PIV
 (•) Fil froid

Simulations LES (6)

► Validation des échanges thermiques

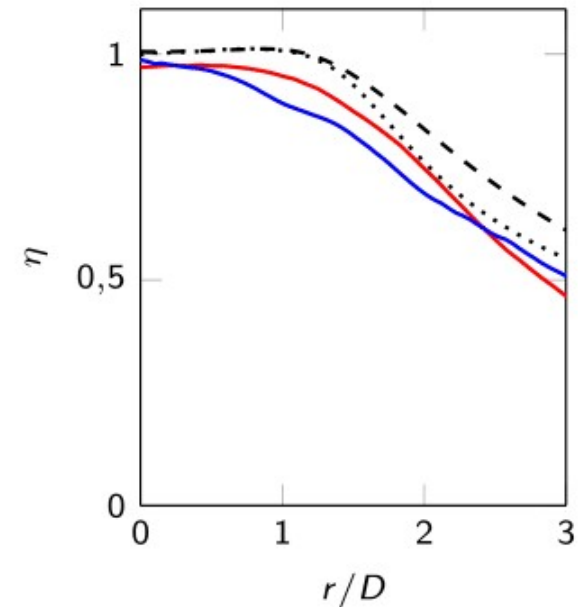
Distribution du nombre de Nusselt Nu_D

$$Nu_D = \frac{hD}{\lambda_f}$$



Distribution de l'efficacité

$$\eta = \frac{T_{ad,p} - T_e}{T_j - T_e}$$

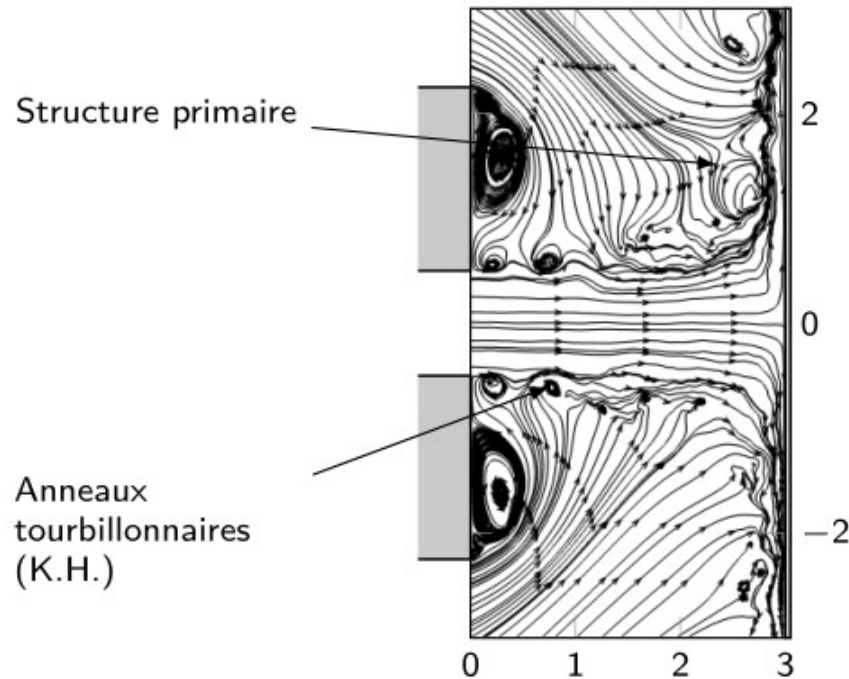


- Prédiction des niveaux de Nu_D bien meilleurs que le RANS.
- Prédiction du second maximum.
- Étendue radiale du plateau $\eta = 1$ réduite ← expansion du jet libre surestimée.

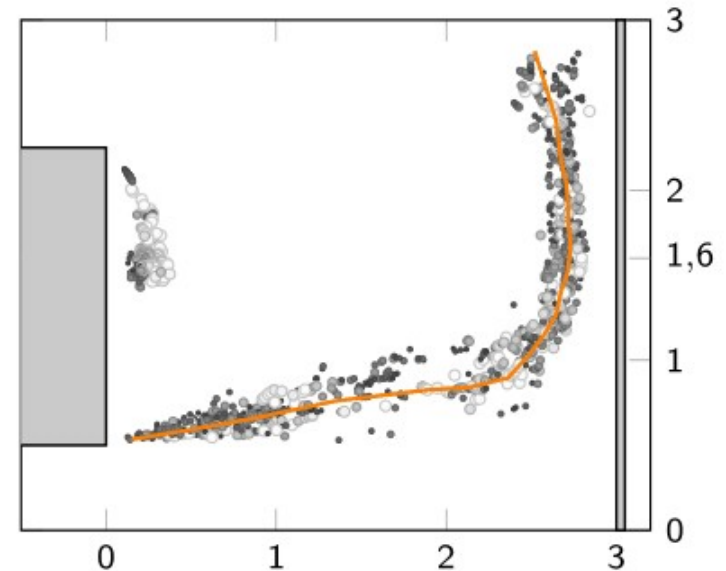
Simulations LES (7)

► Validation topologique : Structures tourbillonnaires

Lignes de courant d'une coupe dans un champ instantané (LES)



Application du critère de détection des structures

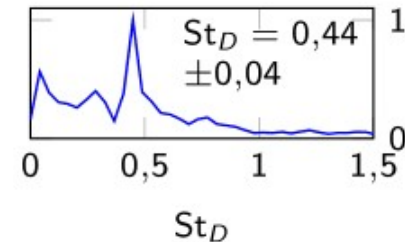
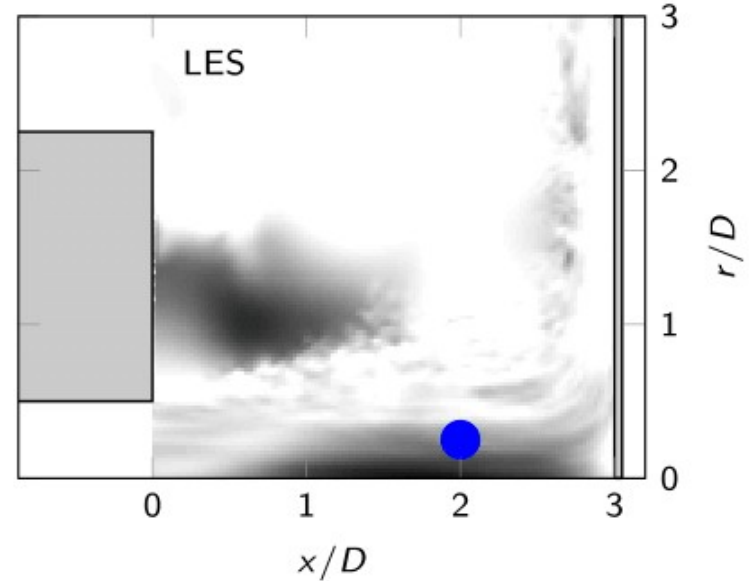
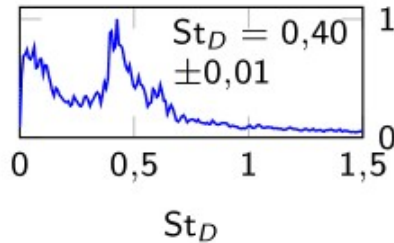
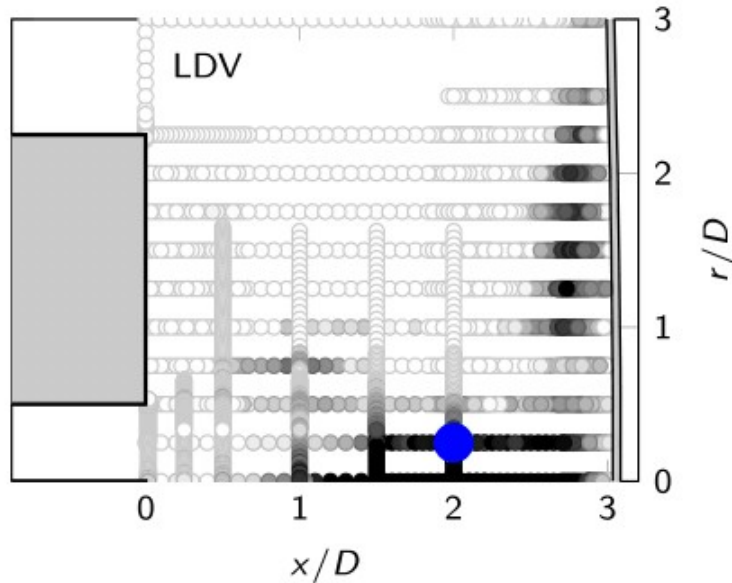


Reproduction de la topologie de l'écoulement du point de vue qualitatif et quantitatif.

Simulations LES (8)

► Validation fréquentielle : Cartographies spectrales

Cartographie spectrale pour la fréquence du mode fondamental sur la vitesse axiale u_x

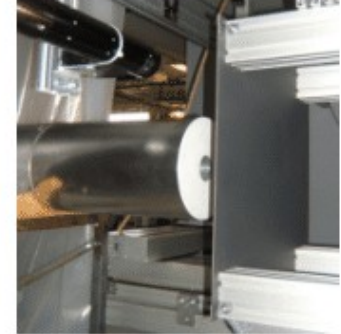


Émergence de la fréquence du mode colonne $St_D = 0,4$ dans le coeur du jet et dans le jet pariétal retrouvé par la simulation LES.

Plan

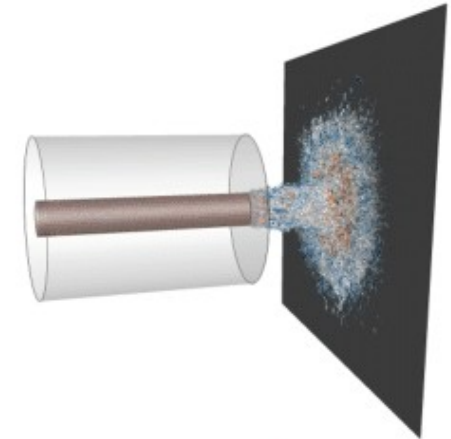
① Caractérisation expérimentale

- Sélection d'une métrologie
- Caractérisation statistique
- Caractérisation topologique
- Caractérisation fréquentielle

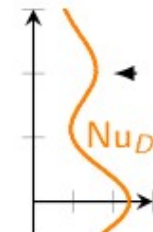


② Simulations LES

- Mise en place
- Validation statistique
- Validation topologique
- Validation fréquentielle



③ Analyse du second maximum

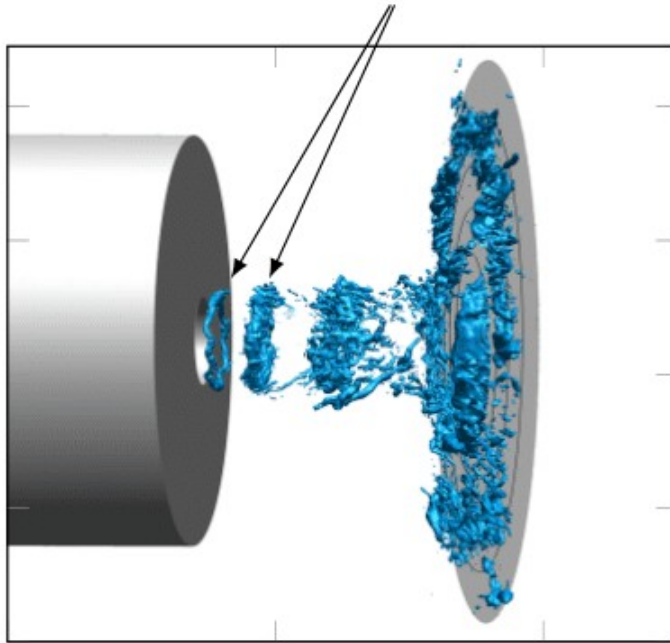


④ Conclusions et perspectives

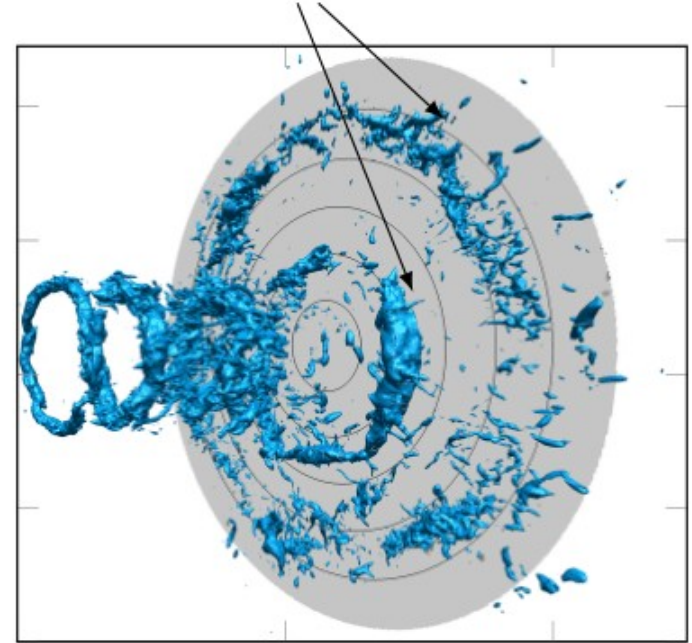
Analyse du Second Maximum (1)

► Structure de l'écoulement

Anneaux tourbillonnaires (K.H.)



Structures primaires



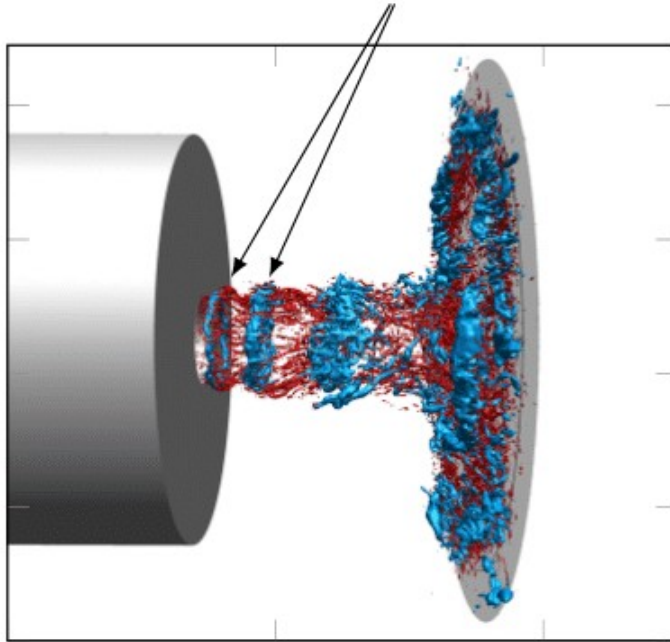
▷ Organisation à grande échelle (*iso-surfaces de la pression*)

✎ Structure primaire avec une certaine cohérence azimuthale.

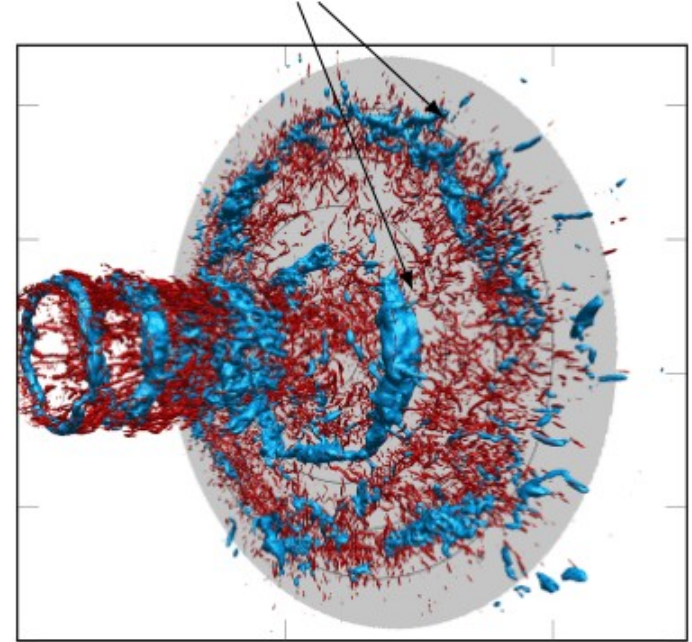
Analyse du Second Maximum (1)

► Structure de l'écoulement

Anneaux tourbillonnaires (K.H.)



Structures primaires



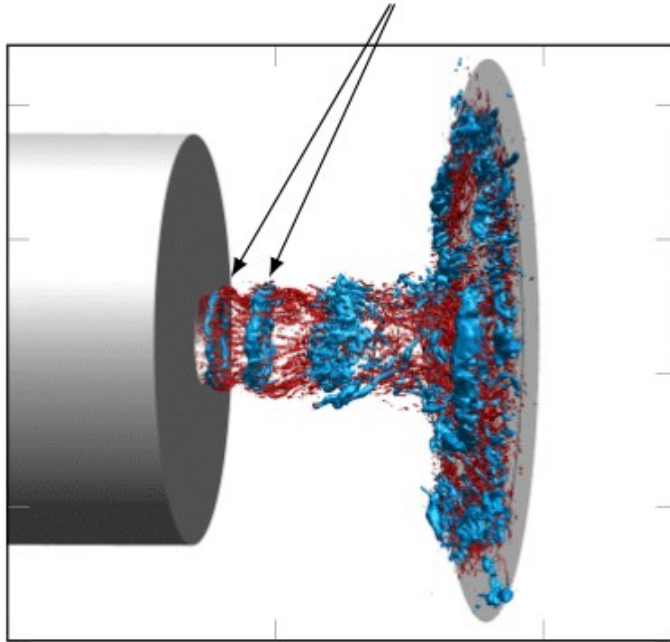
- ▷ Organisation à grande échelle (iso-surfaces de la pression)
- ▷ Organisation à petite échelle (iso-surfaces de critère Q)

☛ Structure primaire avec une certaine cohérence azimuthale.

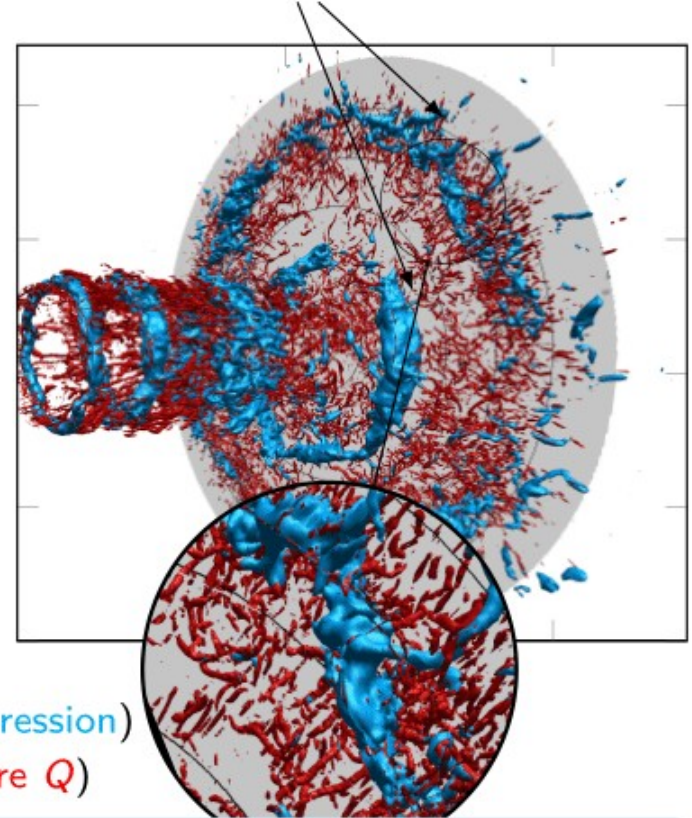
Analyse du Second Maximum (1)

► Structure de l'écoulement

Anneaux tourbillonnaires (K.H.)



Structures primaires



- ▷ Organisation à grande échelle (iso-surfaces de la pression)
- ▷ Organisation à petite échelle (iso-surfaces de critère Q)

- ☛ Structure primaire avec une certaine cohérence azimutale.
- ☛ Développement de structures de petites échelles allongées dans la direction de l'écoulement (*streaks*).

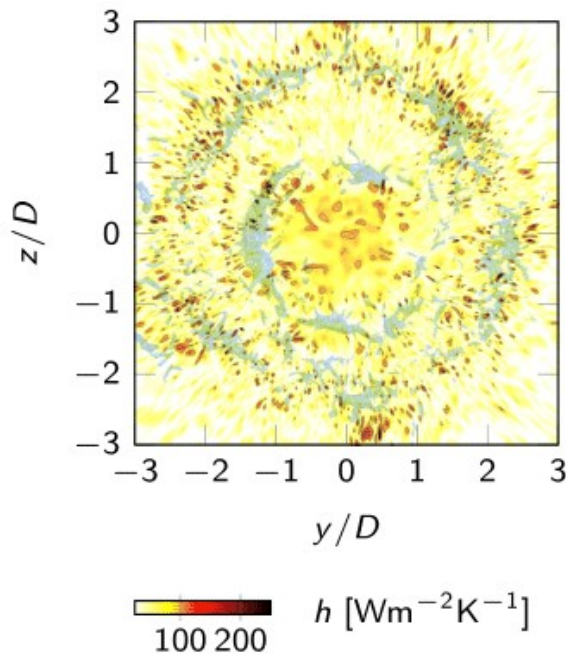
Analyse du Second Maximum (2)

► Rôle d'une structure primaire sur les échanges thermiques

$$\text{Coefficient d'échange convectif } h(r, \theta, t) = \frac{\varphi_c(r, \theta, t)}{T_{ad,p}(r) - T_p}$$

Distribution instantanée de h

$$t/\tau_c = 9$$

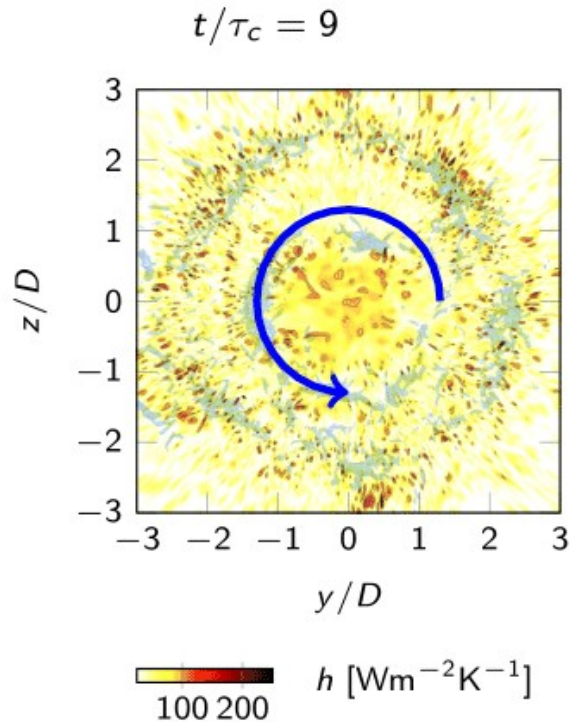


Analyse du Second Maximum (2)

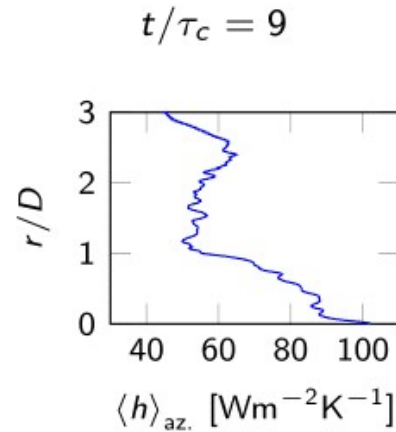
► Rôle d'une structure primaire sur les échanges thermiques

$$\text{Coefficient d'échange convectif} \quad h(r, \theta, t) = \frac{\varphi_c(r, \theta, t)}{T_{ad,p}(r) - T_p}$$

Distribution instantanée de h



Moyenne azimutale de la distribution instantanée de h

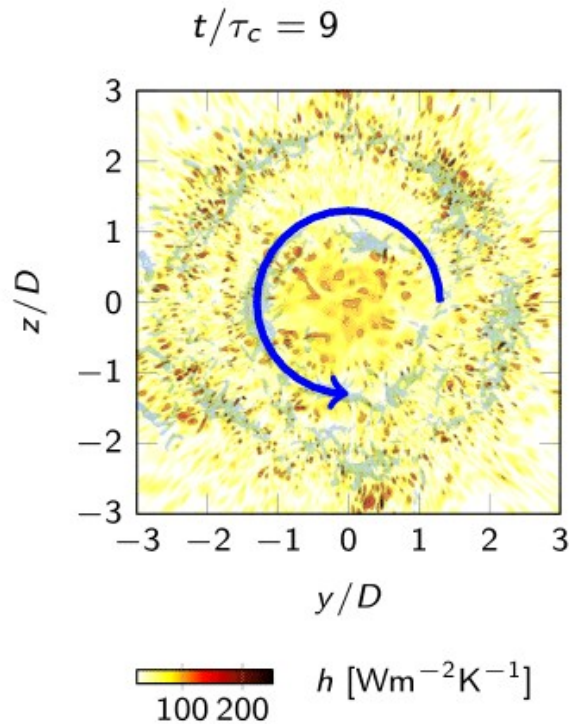


Analyse du Second Maximum (2)

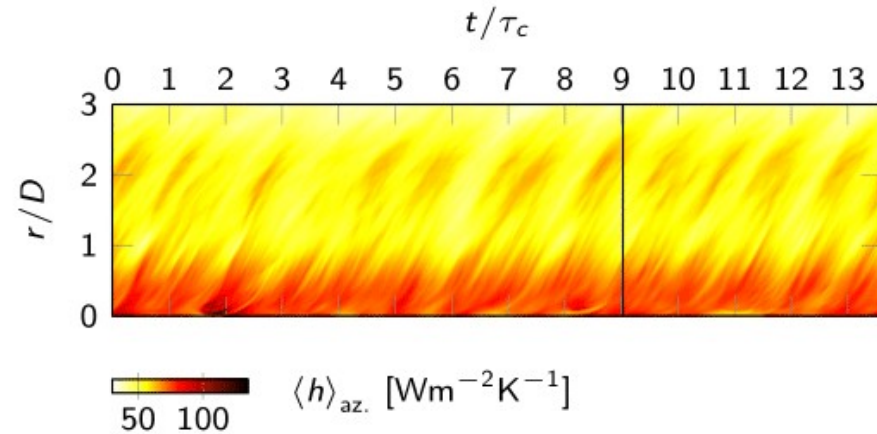
► Rôle d'une structure primaire sur les échanges thermiques

$$\text{Coefficient d'échange convectif } h(r, \theta, t) = \frac{\varphi_c(r, \theta, t)}{T_{ad,p}(r) - T_p}$$

Distribution instantanée de h



Cartographie spatio-temporelle de $\langle h \rangle_{az.}$

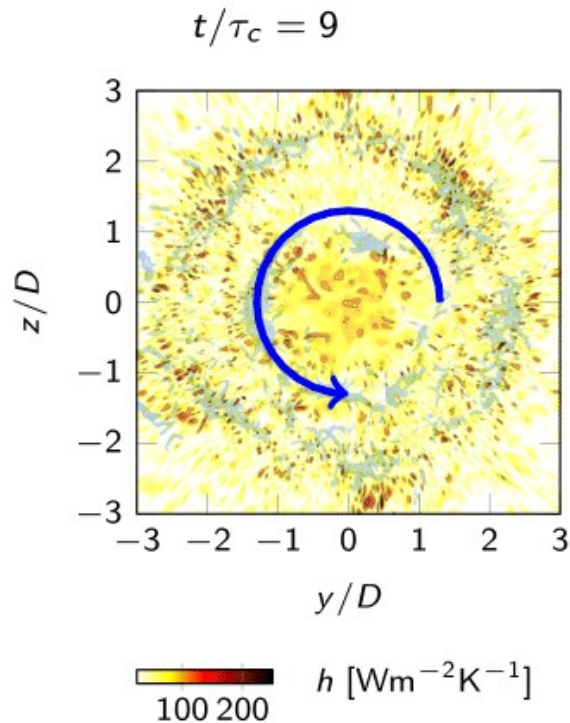


Analyse du Second Maximum (2)

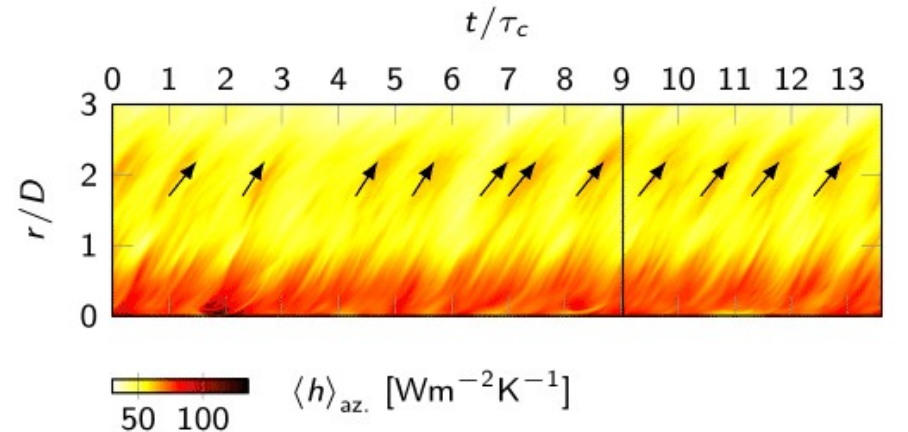
► Rôle d'une structure primaire sur les échanges thermiques

$$\text{Coefficient d'échange convectif } h(r, \theta, t) = \frac{\varphi_c(r, \theta, t)}{T_{ad,p}(r) - T_p}$$

Distribution instantanée de h



Cartographie spatio-temporelle de $\langle h \rangle_{az.}$



- Apparition régulière d'une **augmentation de h** autour de $r/D = 2$ à une période correspondant à $St_D \simeq 0,4$.
- Période correspondant au mode colonne du jet libre.

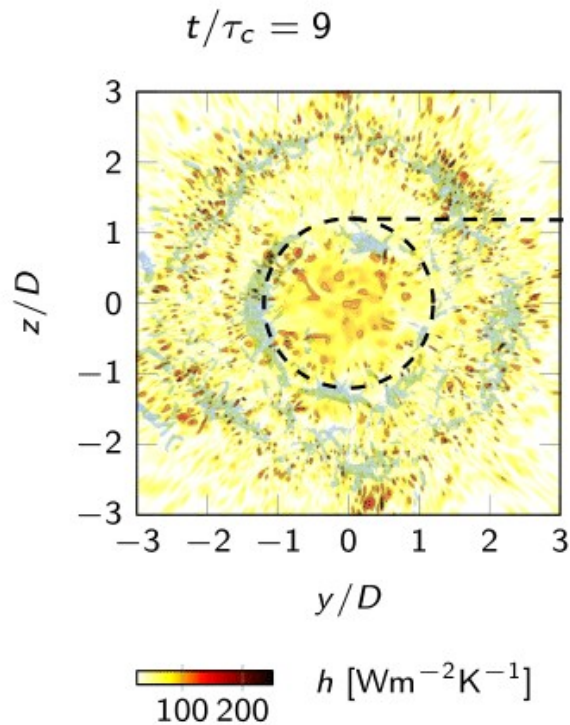
➡ Apparition du second maximum associé au passage d'une **structure primaire**

Analyse du Second Maximum (2)

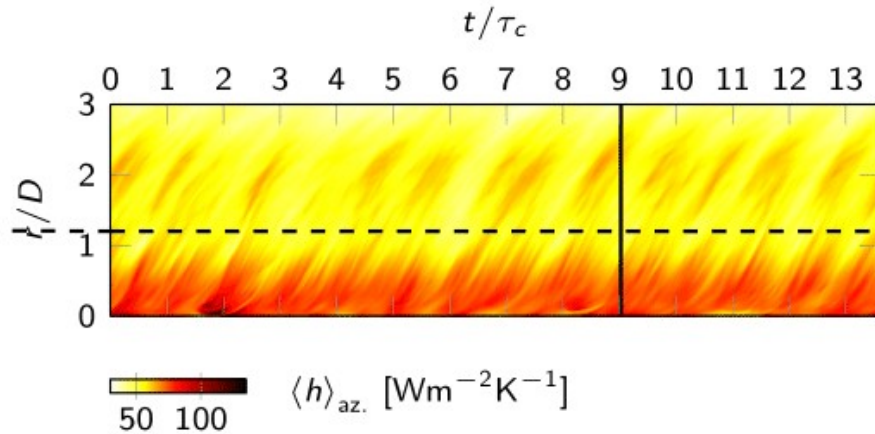
► Rôle d'une structure primaire sur les échanges thermiques

Coefficient d'échange convectif
$$h(r, \theta, t) = \frac{\varphi_c(r, \theta, t)}{T_{ad,p}(r) - T_p}$$

Distribution instantanée de h



Cartographie spatio-temporelle de $\langle h \rangle_{az.}$

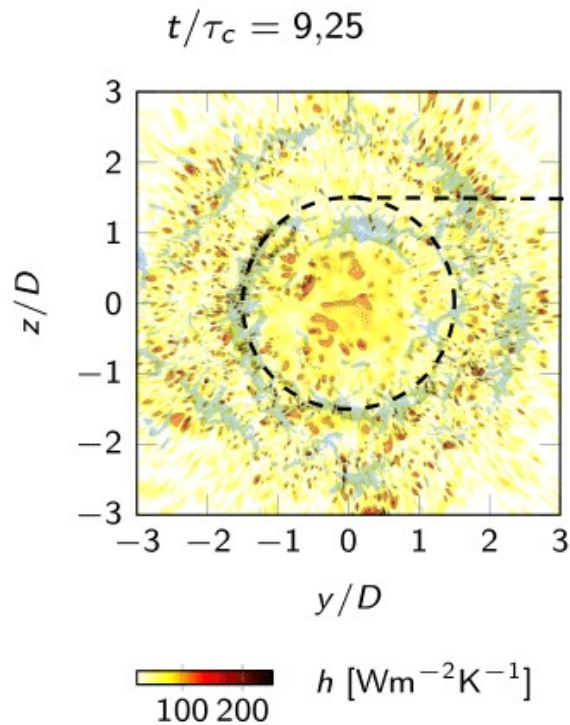


Analyse du Second Maximum (2)

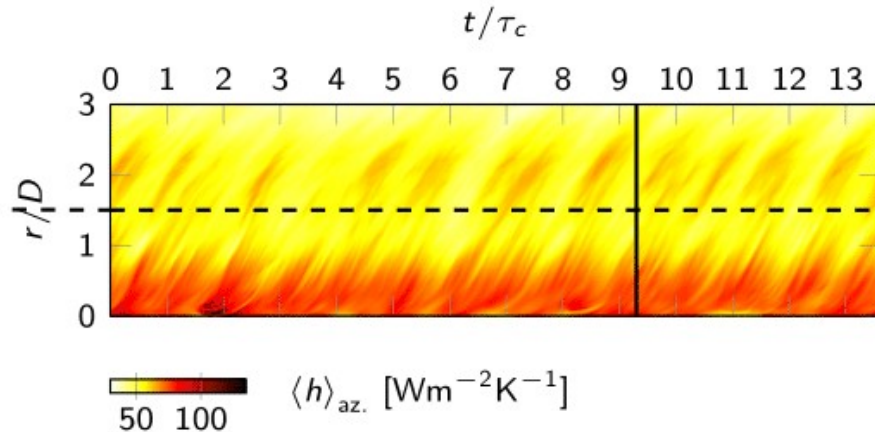
► Rôle d'une structure primaire sur les échanges thermiques

Coefficient d'échange convectif
$$h(r, \theta, t) = \frac{\varphi_c(r, \theta, t)}{T_{ad,p}(r) - T_p}$$

Distribution instantanée de h



Cartographie spatio-temporelle de $\langle h \rangle_{az.}$

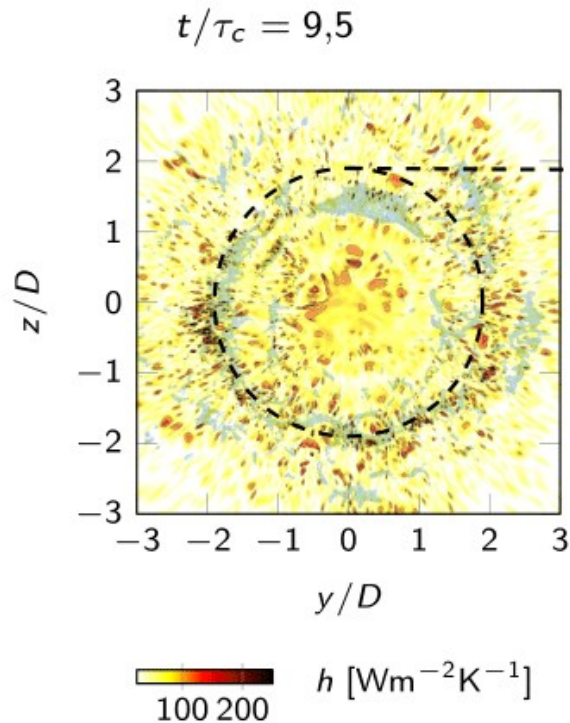


Analyse du Second Maximum (2)

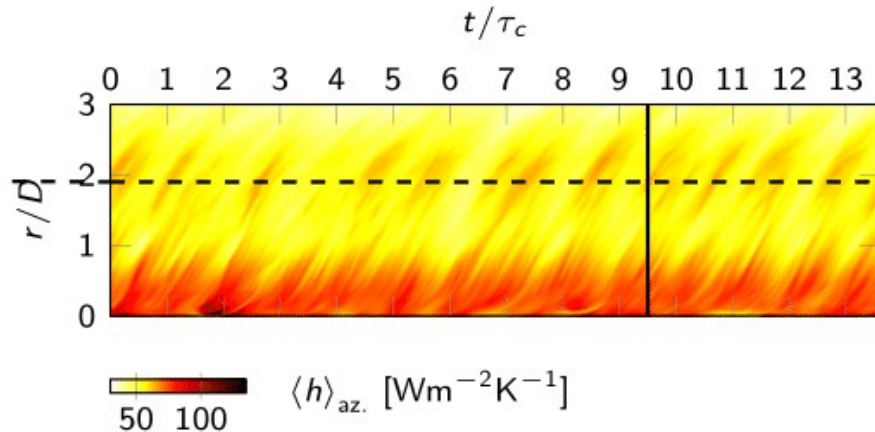
► Rôle d'une structure primaire sur les échanges thermiques

Coefficient d'échange convectif
$$h(r, \theta, t) = \frac{\varphi_c(r, \theta, t)}{T_{ad,p}(r) - T_p}$$

Distribution instantanée de h



Cartographie spatio-temporelle de $\langle h \rangle_{az.}$

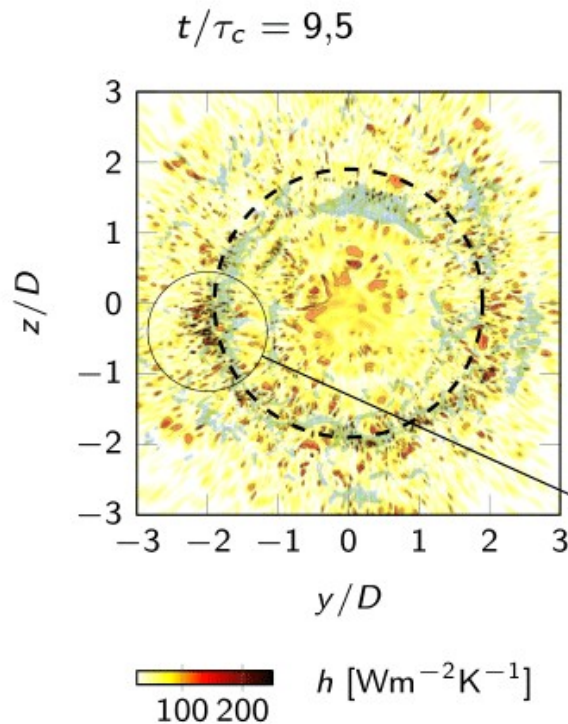


Analyse du Second Maximum (2)

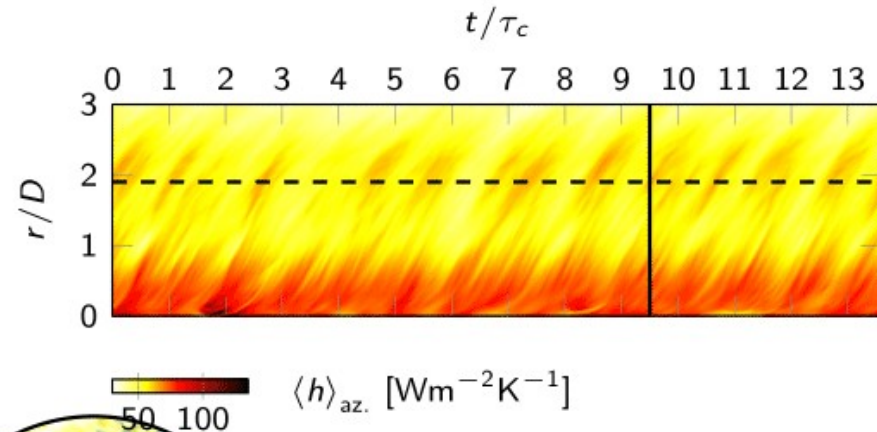
► Rôle d'une structure primaire sur les échanges thermiques

$$\text{Coefficient d'échange convectif } h(r, \theta, t) = \frac{\varphi_c(r, \theta, t)}{T_{ad,p}(r) - T_p}$$

Distribution instantanée de h



Cartographie spatio-temporelle de $\langle h \rangle_{az.}$

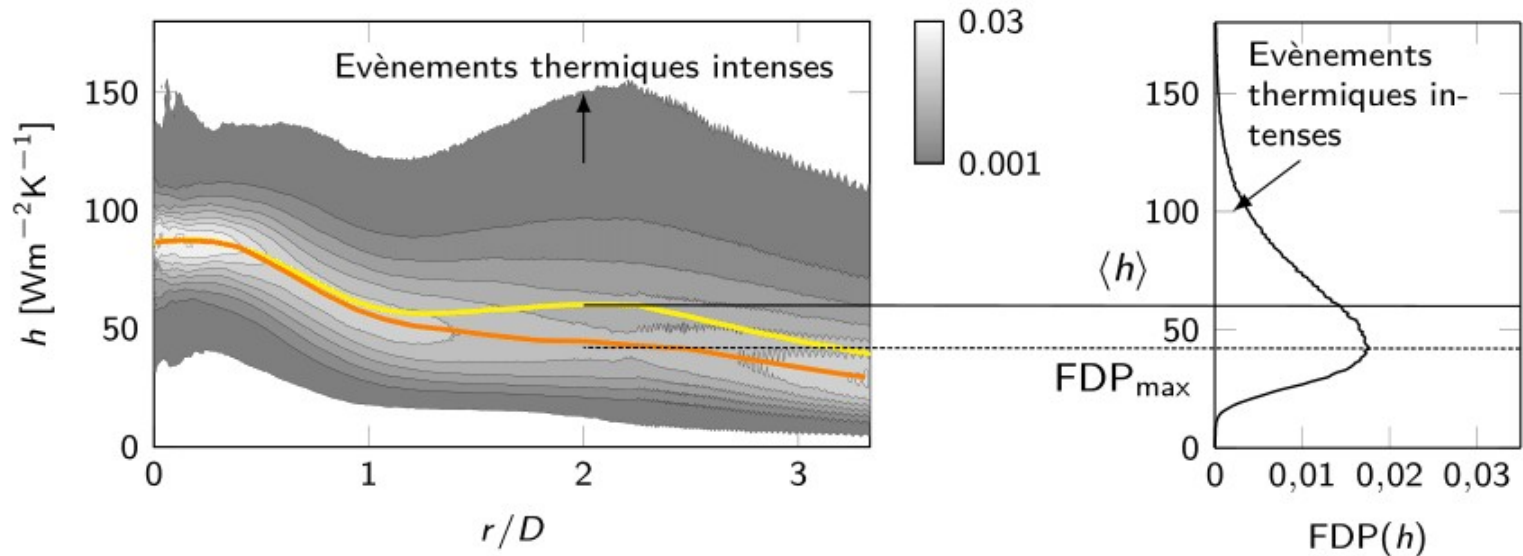


Augmentation périodique de h liée à l'apparition de points chauds localisés.

Analyse du Second Maximum (3)

► Densité de probabilité du coefficient d'échange thermique

Fonction de densité de probabilité (FDP) de $h(\theta, t)$ pour chaque position radiale r



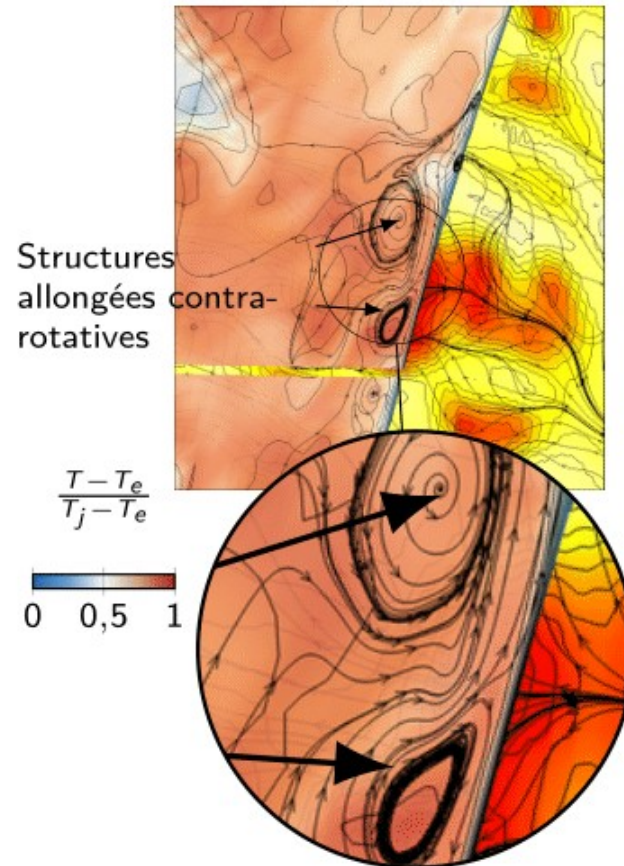
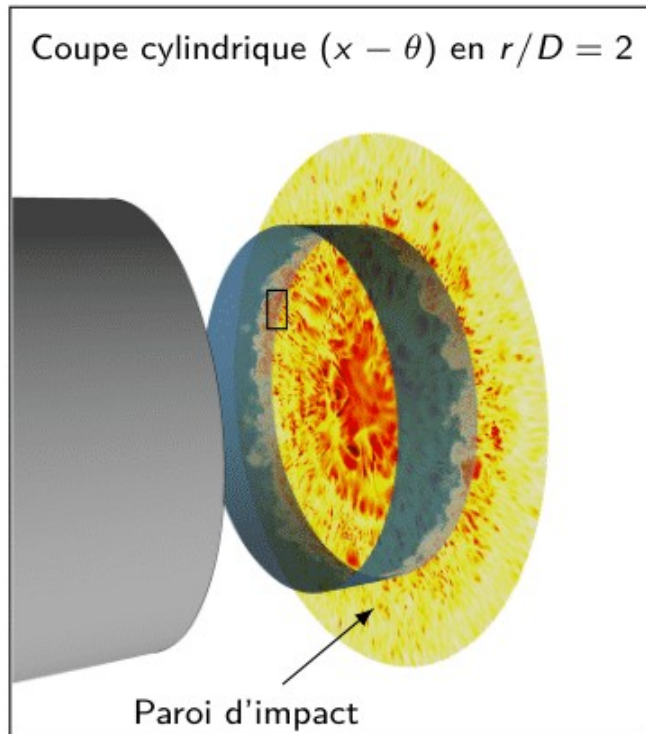
$\langle h \rangle$ (—) → Second maximum.

$h(\text{FDP}_{\text{max}})$ (—) → Décroissance monotone à partir du point d'impact.

► Points chauds responsables de l'émergence du second maximum d'un point de vue statistique.

Analyse du Second Maximum (4)

► Champ aérothermique autour d'un point chaud

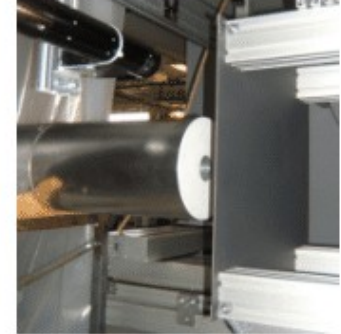


👉 Vitesse axiale dirigée vers la paroi ($u_x > 0$) → fluide chaud apporté vers la paroi.

Plan

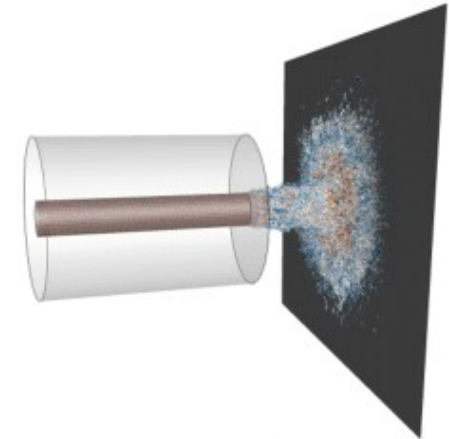
① Caractérisation expérimentale

- Sélection d'une métrologie
- Caractérisation statistique
- Caractérisation topologique
- Caractérisation fréquentielle

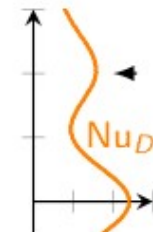


② Simulations LES

- Mise en place
- Validation statistique
- Validation topologique
- Validation fréquentielle



③ Analyse du second maximum



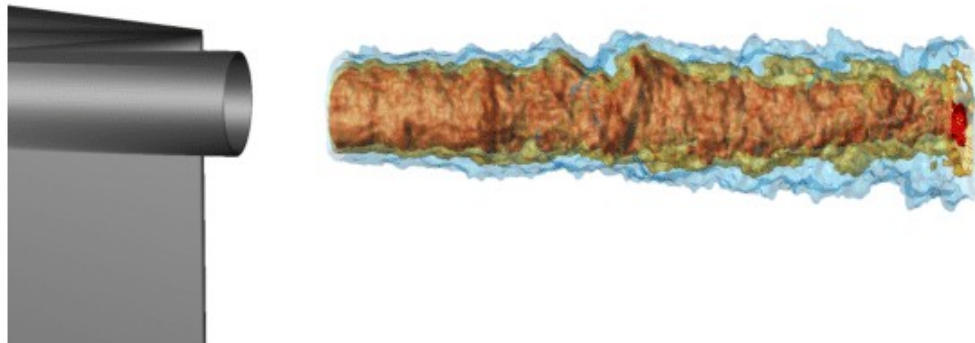
④ Conclusions et perspectives

Conclusions et Perspectives (1)

✓ Base de données complète : statistique, topologique et fréquentielle d'un jet non-isotherme.

✗ Pas de description instantanée 3D de l'écoulement.

- ▷ Utilisation de la TOMO-PIV.
- ▷ Utilisation de la technique de la BOS3D (développée à l'Onera) pour mettre en évidence la structuration 3D instantanée de l'écoulement.



Reconstruction d'un champ instantané de masse volumique par BOS3D sur un jet libre subsonique (Nicolas et al., 2014)

Conclusions et Perspectives (2)

✓ Réalisation d'une simulation LES d'un jet non-isotherme à haut nombre de Reynolds $Re_D = 60\,000$: validation statistique, fréquentielle et topologique.

✗ Écarts sur les champs aérodynamiques.

- ☞ Suppression de l'onde de pression parasite.
- ☞ Utilisation d'un modèle de sous-maille capable de prendre en compte l'anisotropie de sous-maille et le transfert d'énergie inverse.

✗ Coût de calcul important.

- ☞ Implicitation de l'intégration en temps.
- ☞ Utilisation des raccords non-coïncidents.

✓ Proposition d'un scénario pour expliquer l'apparition du second maximum.

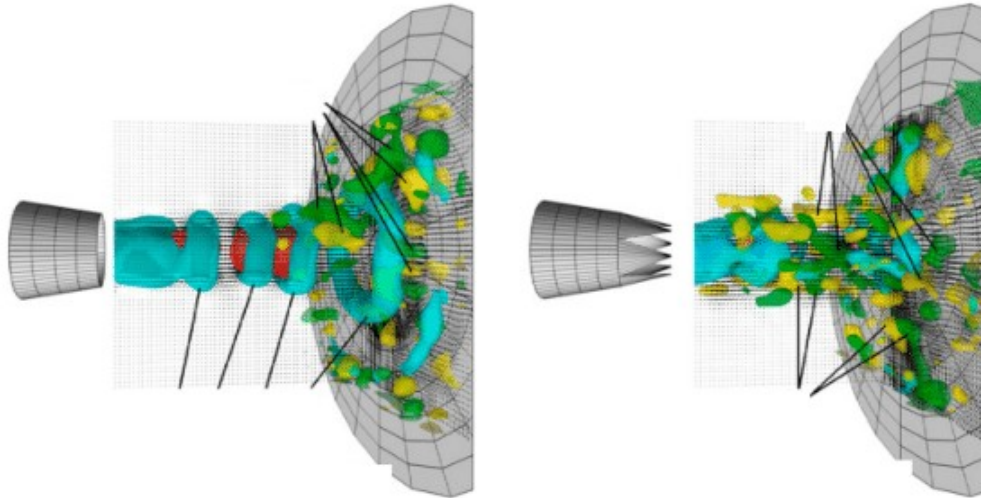
✗ Apparition privilégiée des streaks vers $r/D = 2$?

- ☞ Analyse de stabilité.
- ☞ Analyse des échanges entre vorticité radiale ω_r (streaks) et azimutale ω_θ (structures primaires).

Conclusions et Perspectives (3)

✓ Mise à profit de l'approche duale expérience/numérique : contrôle des conditions aux limites et validation.

▷ Application de la méthodologie à l'étude de concepts permettant l'augmentation de l'efficacité des échanges de chaleur.



Iso-surfaces de critère Q (TOMO-PIV) de Violato et al. (2013) à $Re_D = 5000$