

# Étude expérimentale aérodynamique et thermique d'un jet rond chauffé impactant une paroi plane

Pierre GRENSON<sup>1\*</sup>, Philippe REULET<sup>1</sup>, Bertrand AUPOIX<sup>1</sup>

<sup>1</sup> DMAE, UFT-MiP, ONERA - The French Aerospace Lab - 31000, Toulouse, France

\*(auteur correspondant : pierre.grenson@onera.fr)

**Résumé** - Ce travail porte sur l'étude expérimentale d'une configuration particulière de jet en impact. Un écoulement de conduite turbulente pleinement développé et chauffé débouche dans un environnement à température ambiante et impacte une paroi plane située trois diamètres en aval de la sortie. Le champ de vitesse est caractérisé à l'aide des techniques de vélocimétrie laser à franges (LDV) et de vélocimétrie par images de particules (PIV) tandis que l'utilisation d'une sonde fil froid permet la mesure du champ de température. Les échanges de chaleur au niveau de la paroi d'impact sont quantifiés par la méthode de thermographie en face arrière (ThEFA). Le recours à ces diverses méthodes a permis l'élaboration d'une base de données expérimentale riche.

## Nomenclature

$D$	diamètre de la conduite, m	<i>Symboles grecs</i>	
$H$	distance d'impact, m	$\eta$	efficacité
$T$	température, °C	<i>Indices et exposants</i>	
$u$	vitesse, m/s	$ad$	adiabatique
$U_j$	vitesse débitante, m/s	$e$	ambiant
<i>Repères</i>		$j$	jet
$x, y, z$	coordonnées cartésiennes	$p$	paroi
$x, r, \theta$	coordonnées cylindriques	<i>Opérateurs</i>	
<i>Nombres adimensionnels</i>		$\langle \rangle$	moyenne
$Re_D$	nombre de Reynolds du jet	RMS	écart-type
$Nu_D$	nombre de Nusselt à la paroi		

## 1. Introduction

Les configurations de jet impactant sont régulièrement employées dans les applications industrielles comme le refroidissement des aubes de turbine ou le chauffage des bords d'attaque dans les systèmes anti-givrage, qui requièrent une efficacité élevée des échanges de chaleur sur la paroi. Les principales revues [4] consacrées à cette configuration décrivent la structuration générique de l'écoulement en trois zones ayant leurs caractéristiques propres (figure 1) :

- la zone de *jet libre* présentant les propriétés associées aux écoulements cisailés libres ;
- la *région d'impact* dans laquelle l'écoulement subit une forte décélération et déviation ;
- la *couche pariétale* qui se développe le long de la paroi d'impact.

Cette complexité explique l'intérêt, toujours très grand, porté sur ce type de configuration. Cette dernière constitue, notamment, un cas de validation intéressant pour les simulations numériques et la modélisation de la turbulence. Cette validation repose principalement sur l'utilisation de bases de données expérimentales qui se doivent d'être les plus complètes possible. Malgré le grand nombre d'études ayant déjà été conduites sur le sujet, il est assez rare de trouver des données couvrant l'ensemble des grandeurs physiques sur une même configuration, les auteurs préférant se concentrer spécifiquement sur les échanges pariétaux [7] ou la dynamique seule

[12]. De plus, les caractéristiques de l'écoulement dépendent de nombreux paramètres (hélas, pas toujours clairement précisés), tels que l'état du jet en sortie de buse ou le confinement, entraînant une certaine disparité des résultats.

C'est dans ce contexte que se place la présente étude dont l'objectif porte sur la caractérisation, à l'aide de différentes techniques de mesure, d'une configuration de jet en impact peu rencontrée dans la littérature, à haut nombre de Reynolds et faible distance d'impact. Contrairement à la plupart des études, qui portent sur des configurations isothermes, le jet est ici préalablement chauffé et débouche dans un environnement à température ambiante. À la connaissance des auteurs, aucune caractérisation du champ thermique n'a encore été réalisée sur ce type de configuration.

On présentera d'abord le banc d'essai ainsi que les moyens de mesures mis en œuvre (section 2). On décrira ensuite (section 3) les principaux résultats.

## 2. Dispositif expérimental

Le banc d'essais est constitué d'une conduite longue et de la plaque impactée (figure 2). L'origine du système d'axe est placée au centre de la section de sortie, l'axe  $x$  étant aligné avec l'axe du jet tandis que les axes  $y$  et  $z$  appartiennent au plan de sortie.

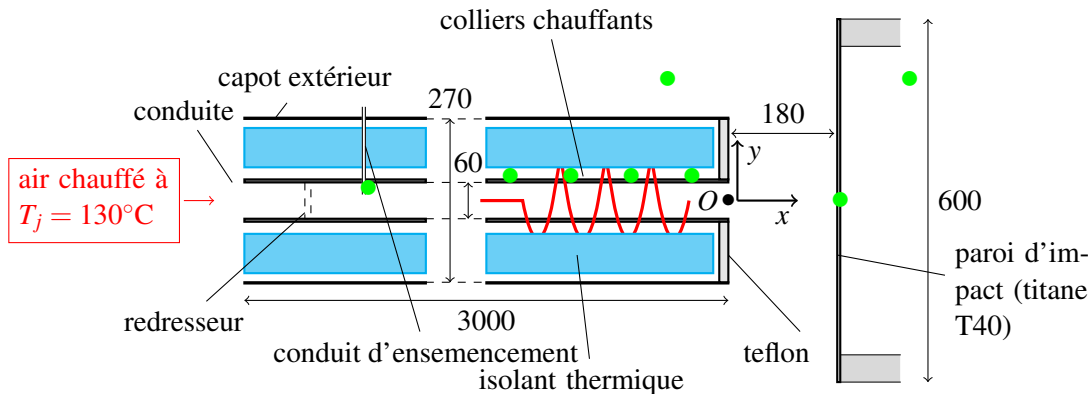


Figure 2 : Description schématique du banc d'essai. Les points vert (●) dénotent la position des thermocouples. Les dimensions sont exprimées en mm.

Un flux d'air continu, généré par un compresseur et préalablement chauffé à l'aide d'un échangeur de chaleur électrique, est injecté dans une conduite de trois mètres de long et de diamètre  $D = 60\text{mm}$ . Le débit et la température de l'air injecté sont réglés à  $63,5\text{g/s}$  et  $T_j = 130^\circ\text{C}$ , respectivement. Des colliers chauffants, également réglés en température, sont enroulés autour de la conduite afin de maintenir la température de l'écoulement tandis qu'un

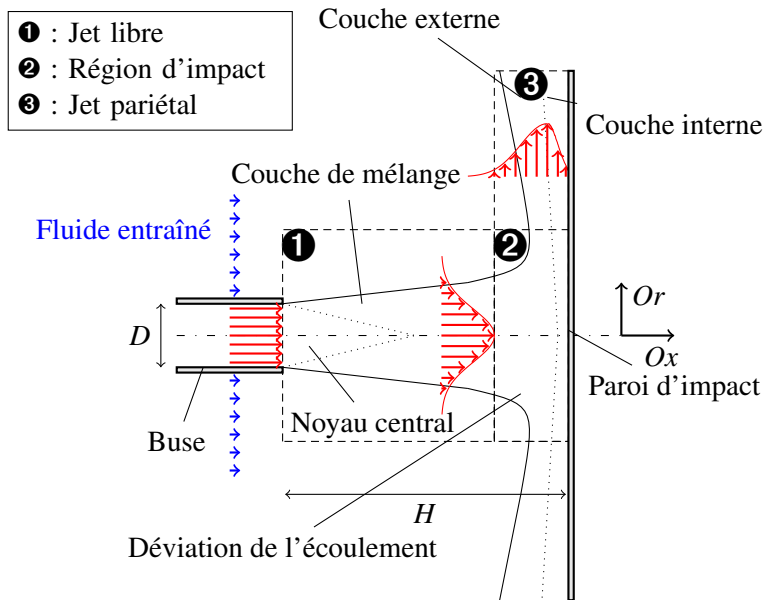


Figure 1 : Structuration générique de l'écoulement pour une configuration de jet en impact.

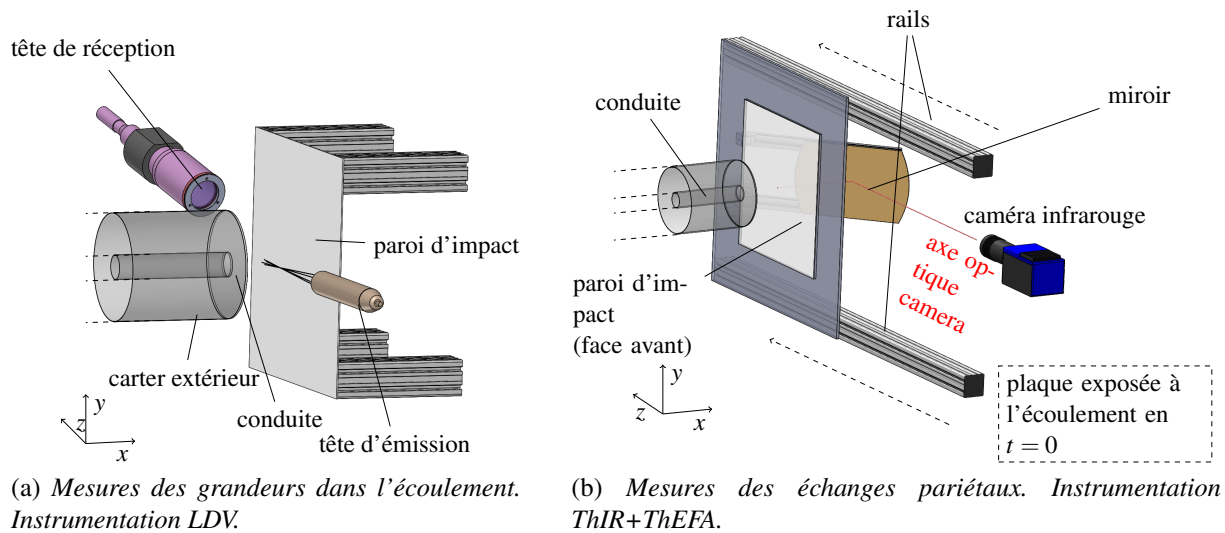


Figure 3 : Configurations expérimentales

capot extérieur est placé autour de la conduite et rempli d'un matériau isolant afin de minimiser les pertes de chaleur. Dans ces conditions l'écoulement atteint une vitesse débitante  $U_j = 25,7 \text{ m/s}$ , ce qui correspond à un nombre de Reynolds  $Re_D$ , basé sur le diamètre de la conduite, de 60000. Afin d'éviter tout effet de *swirl*, un redresseur a été placé au niveau de la section d'entrée de la conduite.

La plaque de titane (T40) soumise à l'impact, d'épaisseur 3 mm, est placée normalement à l'axe du jet sur un chariot indépendant permettant d'ajuster la distance d'impact. Dans ce travail, cette dernière a été fixée à  $H/D = 3$ . Deux configurations ont été utilisées en fonction des mesures à effectuer. Pour les mesures dans l'écoulement (figure 3a), la plaque de surface  $600 \times 600 \text{ mm}$  est fixée sur des supports inamovibles au niveau des coins. Pour la mesure des échanges pariétaux (figure 3b), cette même plaque est encastrée dans un cadre fixé sur des rails afin de pouvoir introduire la paroi de manière quasi-instantanée dans l'écoulement chaud.

L'environnement thermique du montage est contrôlé par une dizaine de thermocouples de type *K*. La température de référence du jet est évaluée à l'entrée de la conduite tandis que la température ambiante est mesurée par deux sondes respectivement positionnées au niveau du capot et à l'arrière de la plaque (figure 2). La qualité de la régulation garantit une variation de  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  autour de la température cible. La température ambiante du laboratoire  $T_e$ , qui dépend légèrement des conditions météorologiques, est de  $25 \pm 2^\circ\text{C}$ .

Le tableau 1 rassemble les principales caractéristiques des moyens de mesure mis en œuvre.

	résolution spatiale	résolution temporelle (fréq. max.)	grandeurs accessibles	mesures
LDV		$\times (\sim 10 \text{ kHz})$	$u_x, u_z$	1500 points
S-PIV	$\times$		$u_x, u_y, u_z$	9 fenêtres dans le plan longitudinal ( $Oxy$ )
Fil froid (CWT)		$\times (\sim 3 \text{ kHz})$	$T$	1500 points
ThIR+ThEFA	$\times$		$Nu_D, T_{ad,p}, T_p$	paroi d'impact

Tableau 1 : Moyens de mesure et grandeurs mesurées

Les 3 composantes du champ de vitesse sont mesurées à l'aide d'un dispositif PIV comprenant un laser pulsé double cavité et de deux caméras CCD haute définition ( $2330 \text{ px} \times 1777 \text{ px}$ ),

l'ensemble étant synchronisé par un contrôleur LaVision. La nappe laser (épaisseur  $\sim$  mm) est alignée avec l'axe du jet et située dans le plan longitudinal  $Oxy$ . Les caméras sont placées symétriquement de part et d'autre de la nappe en configuration diffusion avant afin de maximiser la quantité de lumière reçue. Un revêtement de Rhodamine 6D est déposé sur la plaque afin de limiter l'effet des réflexions de la nappe et garantir une mesure de l'écoulement aussi proche de la paroi que possible. De l'huile DEHS atomisée (gouttes micrométriques) est injectée dans la conduite et au niveau du capot extérieur dans le but d'ensemencer à la fois le jet et l'air entraîné. Le domaine d'intérêt est divisé en 9 fenêtres de mesure, chacune correspondant à une dimension physique de  $100\text{mm} \times 90\text{mm}$ . L'ensemble du système caméra+laser est fixé sur un banc de déplacement à 3 axes permettant d'explorer l'ensemble du domaine. Pour chaque fenêtre, une série de 2000 doublets d'images a été enregistrée à une fréquence d'acquisition de 10Hz, le temps entre deux pulses laser ayant été adapté aux vitesses caractéristiques de la zone observée. Le post-traitement est réalisé à l'aide du logiciel FOLKI-SPIV développé par l'ONERA [5]. La résolution spatiale du champ de vitesse obtenu est de 0,87 mm.

Le vélocimètre laser LDV (figure 3a) est constitué d'un laser Spectra Physics 2017 (1W) et d'une tête d'émission TSI-9832 (distance focale de 600mm) émettant deux paires de faisceaux (vert : 541 nm et bleu : 476nm), afin de mesurer simultanément deux composantes du vecteur vitesse. La tête de réception, en configuration de diffusion avant, est reliée à un analyseur IFA755. Le volume de mesure ellipsoïdal de dimension  $0,1\text{mm} \times 1,6\text{mm}$  est aligné avec l'axe  $z$ . L'ensemencement et le système de déplacement sont identiques à celui utilisé pour la S-PIV. Les signaux mesurés (200000 particules/points), à échantillonnage variable, sont traités à l'aide d'ASSA [9], un logiciel dédié de l'ONERA.

Les mesures de température sont réalisées par l'intermédiaire d'une sonde fil froid DANTEC 55P31 et d'un module à courant constant DANTEC 90C20. La loi d'étalonnage tension-température est déterminée *in situ* à l'aide d'un thermomètre certifié COFRAC (Pt100). Le support de sonde ainsi que sa fixation sur le système de déplacement sont adaptés à la zone de l'écoulement traitée afin de minimiser l'effet intrusif du moyen de mesure. La fréquence d'échantillonnage est de 6kHz pour une durée de signal de 30s.

La méthode inverse ThEFA (Thermographie En Face Arrière) [11] permet de calculer le nombre de Nusselt et la température adiabatique de paroi sur la base de la mesure de l'évolution du champ de température sur la face non-impactée de la plaque lorsque celle-ci est subitement introduite dans l'écoulement et soumise au flux de chaleur (figure 3b). La thermographie est réalisée à l'aide d'une caméra FLIR SC7650 MWIR ( $640\text{px} \times 512\text{px}$ ), la face arrière de la plaque étant recouverte d'une peinture d'émissivité connue. Pour des raisons de compacité, la caméra est pointée vers un miroir redirigeant les rayons issus de la face à mesurer (figure 3b).

### 3. Résultats

Dans la mesure où la configuration de jet rond en impact est statistiquement axisymétrique, les composantes de la vitesse sont représentées dans le référentiel cylindrique  $u_x, u_r$  et  $u_\theta$ .

#### 3.1. Caractérisation de l'écoulement

Tout d'abord, la mesure des profils de vitesse moyenne et fluctuante à la sortie de la conduite à l'aide de la LDV et S-PIV (figure 4) permet de vérifier le caractère pleinement développé de l'écoulement. Le profil de vitesse (figure 4a) se compare parfaitement au profil canonique établi par Nagib et Chauhan [10] sur la base de mesures expérimentales pour des écoulements de conduite. Les profils de vitesse fluctuante axiale et radiale (figure 4b) exhibent les caracté-

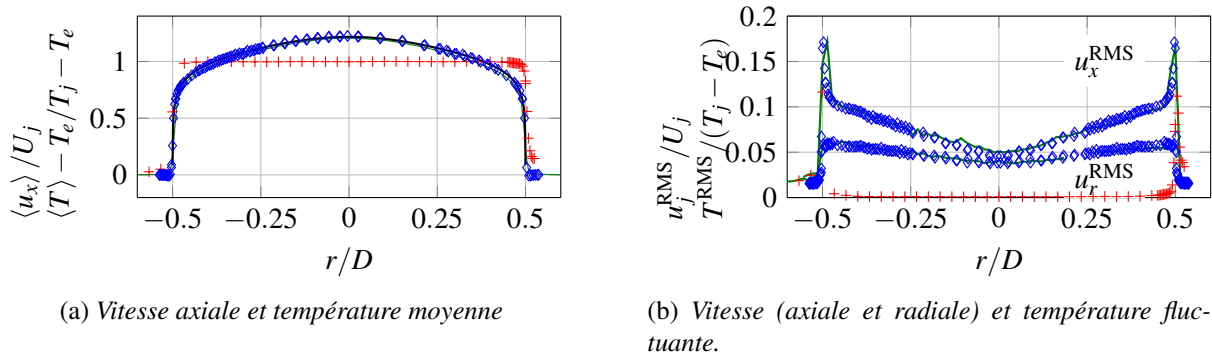


Figure 4 : Profils à la sortie de la conduite. — : S-PIV – ♦ : LDV – — : profil canonique – + : fil froid.

ristiques d'un écoulement pleinement développé avec un taux de turbulence important (4% au centre et 12% en proche paroi) sur l'ensemble de la section mesurée. La température en sortie de conduite est uniforme et constante (fluctuations proche de zero).

La figure 5 montre les champs moyens et fluctuants mesurés par S-PIV dans le plan longitudinal. Les profils de vitesse et température, moyenne et fluctuante, mesurés par S-PIV, LDV et fil froid dans la couche pariétale à différentes stations le long de la paroi d'impact sont représentés à la figure 6. Sur la base des ces figures, on décrit, dans les sections suivantes, la structuration de l'écoulement.

**Champs moyens** On constate tout d'abord que le contournement du capot par l'air entraîné par le jet génère un bulbe de recirculation (figure 5a). Après la sortie de la conduite, le jet subit une expansion radiale jusqu'à ressentir la présence de la paroi, à environ  $x/D = 2$ , où il subit un ralentissement important ainsi qu'une déviation de  $90^\circ$  conduisant au développement du jet pariétal. À cause du gradient de pression négatif, l'écoulement est progressivement accéléré à partir du point d'arrêt jusqu'à atteindre une vitesse radiale maximale en  $r/D = 1$ . À partir de cette position, la vitesse maximale dans la couche pariétale diminue à cause des effets de mélange et de l'expansion radiale. Les profils de température moyenne dans la couche pariétale ont une allure similaire aux profils de vitesse radiale (figure 6a), avec notamment une diminution de la température maximale lorsque l'on avance dans la couche pariétale.

**Champs fluctuants** Dans le jet libre, la couche de mélange s'épaissit dans la direction axiale à partir de la sortie mais n'atteint pas le cœur du jet avant l'impact (figure 5c). La zone centrale du jet n'étant pas affectée par la turbulence produite dans la couche de mélange, les fluctuations dans ce noyau proviennent principalement de la turbulence de conduite. La région d'impact est caractérisée par la diminution des fluctuations axiales, dû au blocage de la paroi, au profit d'une augmentation des fluctuations radiales en très proche paroi, associée au développement de la couche limite interne (figure 6,  $r/D = 0,5$ ). À  $r/D = 1,5$  et 2 (figure 6), les profils de fluctuations radiales présentent un minimum qui peut être associé à la séparation entre la couche externe (de type couche de mélange) et la couche interne (de type couche limite) du jet pariétal. Cette séparation se marque également sur le changement de pente observé sur les profils de température fluctuante pour  $r/D \geq 1,5$  (figure 6). Notons enfin que la région  $1,5 < r/D < 2$  est caractérisée par les fluctuations de température et de vitesse radiale les plus élevées de l'écoulement (figures 5d et 6).

**Qualité des mesures** Les mesures S-PIV (figure 5) montrent que la symétrie de l'écoulement par rapport à l'axe du jet est excellente. Les profils dans la couche pariétale montrent

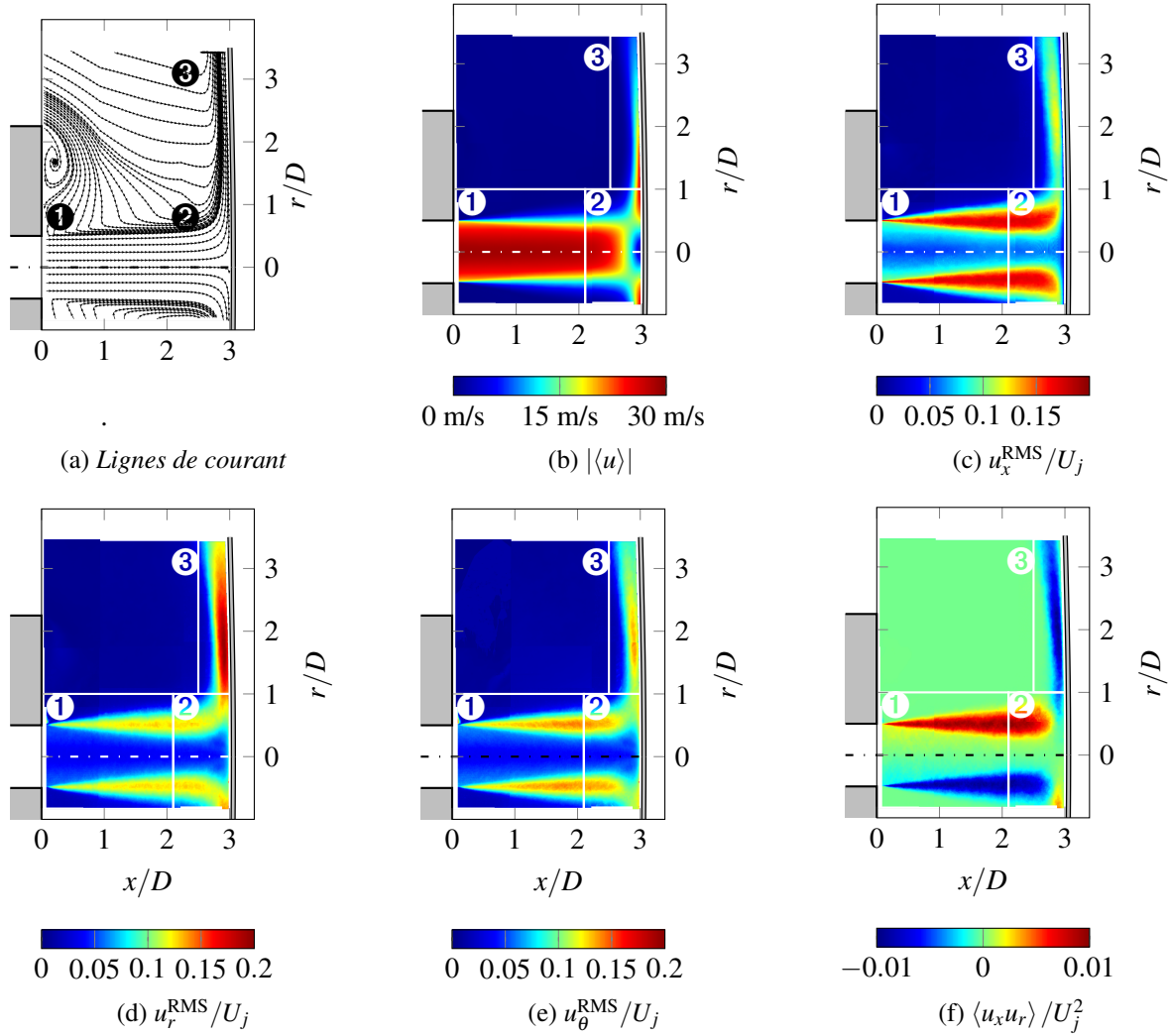
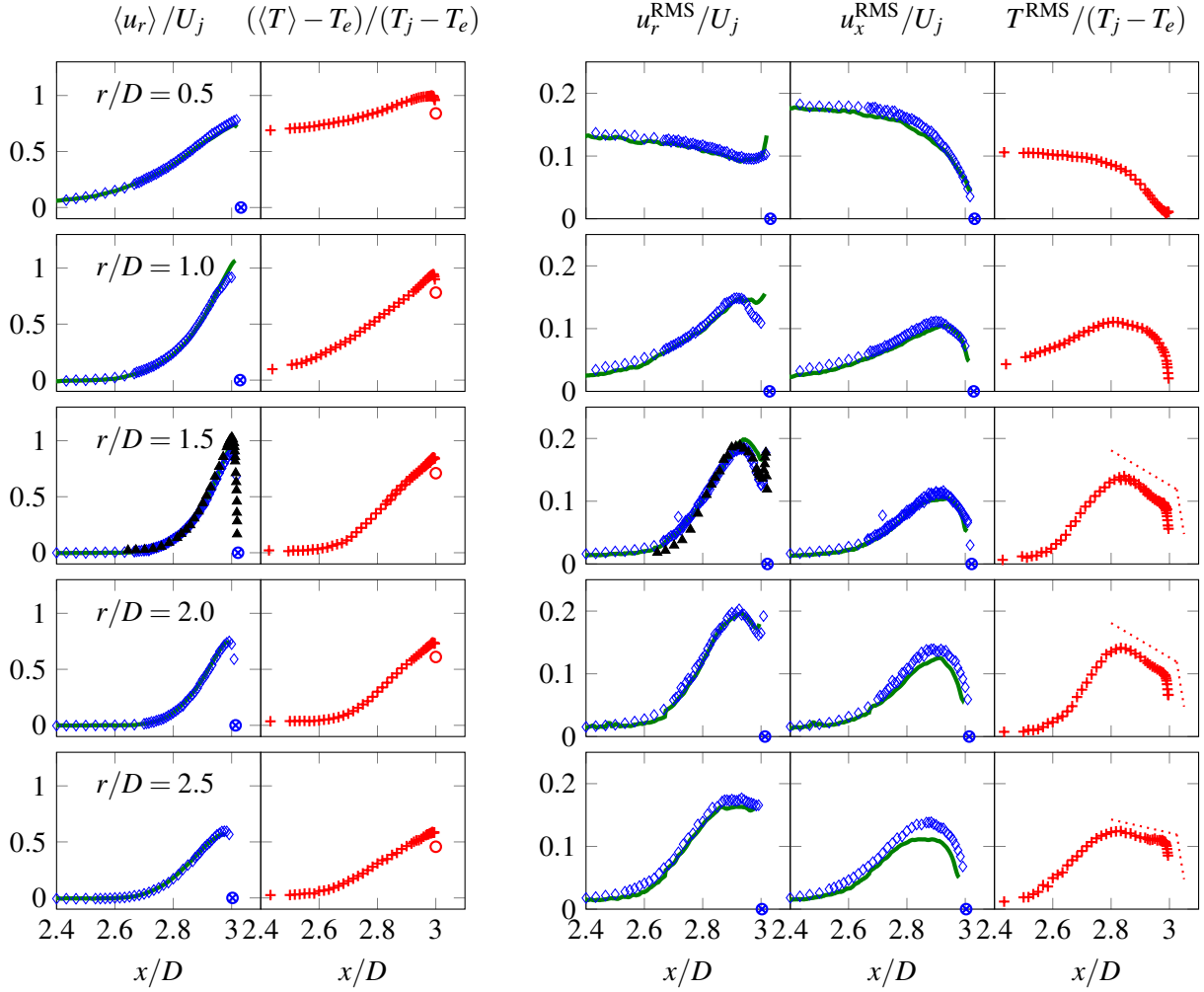


Figure 5 : S-PIV (statistiques). ❶ : jet libre – ❷ : région d'impact – ❸ : couche pariétale

que l'accord entre les mesures de vitesse LDV et S-PIV est très satisfaisant pour les profils moyens tandis que de légères différences sont observées pour les profils fluctuants, notamment à  $r/D = 1$  dans la zone de proche paroi où la PIV est moins adaptée et à  $r/D = 2,5$  où la densité d'ensemencement s'est révélée plus faible. Enfin, les mesures fil chaud de Cooper *et al.* [6] réalisées sur une configuration similaire corroborent les résultats obtenus.

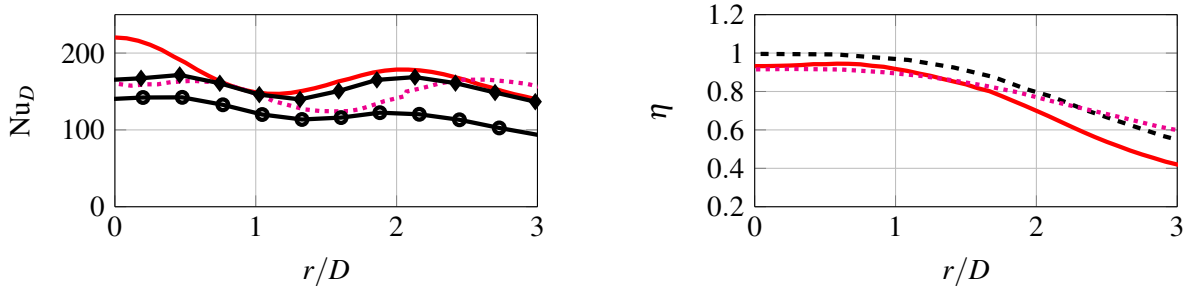
### 3.2. Échanges pariétaux

Le résultats des mesures de thermographie et de l'application de la méthode inverse ThEFA montre que le nombre de Nusselt présente un maximum au point d'impact et un second maximum à  $r/D = 2$ . La présence de ce dernier a été reportée dans la littérature [4] pour  $H/D < 4$ . Parmi les différentes explications proposées sur son origine, l'hypothèse la plus généralement soutenue lie son apparition à l'interaction avec la paroi des grosses structures turbulentes (dites *primaires*) convectées dans la couche pariétale ; ceci menant au déclenchement d'un décollement instationnaire très proche de la paroi [12]. Les hauts niveaux de fluctuation de vitesse radiale observés entre  $1,5 < r/D < 2$  peuvent s'expliquer comme la trace du passage des structures primaires. Le maximum au point d'arrêt, non observé dans les mesures de la littérature sur des jets issus d'une buse convergente (figure 7a), se justifie quant à lui par la turbulence déjà présente dans le noyau du jet dès sa sortie de la conduite [8].



(a) Grandeurs moyennes. Vitesse radiale (à gauche) et température (à droite) (b) Grandeurs fluctuantes. Vitesse radiale (à gauche), vitesse axiale (au centre) et température (à droite).

Figure 6 : Comparaison des profils de vitesse et de température à différentes stations radiales dans la couche pariétale (chaque ligne correspond à une station radiale). — : S-PIV —  $\diamond$  : LDV — + : CWT —  $\circ$  : position de la paroi —  $\circ$  : température paroi (ThIR) —  $\dots$  : pente —  $\blacktriangle$  : données expérimentales de Cooper et al.[6] ( $Re_D = 70,000$ ,  $H/D = 3$ , conduite pleinement développée).



(a) Distribution du nombre de Nusselt. — : ThEFA,  $\dots$  : Buchlin and Laperches [3] ( $Re_D = 60000$ ,  $H/D = 2,6$ , buse convergente), ligne continue noire : Hofmann et al. [7] ( $H/D = 2,5$ , buse convergente) —  $\circ$  :  $Re_D = 53000$ , —  $\blacktriangle$  :  $Re_D = 68000$

(b) Distribution de l'efficacité. — : ThEFA, - - - : Brevet[1] ( $Re_D = 23000$ ,  $H/D = 3$ , conduite développée),  $\dots$  : Buchlin [2] ( $Re_D = 20000$ ,  $H/D = 3$ , buse convergente)

Figure 7 : Comparaison des mesures ThEFA sur la paroi d'impact (moyenné azimutalement) avec les résultats expérimentaux de la littérature sur des configurations utilisant paroi chauffée.

La température adiabatique de paroi  $T_{ad,p}$  est représentée sous forme adimensionnelle par le concept d'efficacité  $\eta = (T_{ad,p} - T_e)/(T_j - T_e)$  à la figure 7b. L'efficacité présente un plateau proche de l'unité du point d'arrêt à  $r/D = 1$ . Cette distribution est caractéristique des faibles rapports  $H/D$  pour lesquels l'impact se fait avant la fin du noyau thermique du jet. Par ailleurs, cette distribution est très peu sensible au nombre de Reynolds [1], comme le montre la comparaison avec les mesures issues de jets à  $Re_D$  plus faible.

## 4. Conclusion

Comme rarement rencontré dans la littérature, une configuration particulière de jet impactant a été caractérisée expérimentalement du point de vue aérodynamique et thermique, à la fois dans l'écoulement et au niveau de la paroi. L'accord entre plusieurs techniques de mesures et des résultats antérieurs de la littérature donne du crédit aux données récoltées. En outre, le champ de température est, pour la première fois, décrit sur une telle configuration. La suite des travaux concernera l'étude des instantanés S-PIV et les données fréquentielles issues des mesures ponctuelles dans le but de caractériser la dynamique instationnaire de l'écoulement, en s'intéressant notamment aux structures turbulentes primaires de la couche pariétale. Par ailleurs, la base de données qui a été élaborée a servi de référence pour la validation de simulations numériques effectuées sur cette même configuration.

## Références

- [1] P. BREVET : *Etude expérimentale et numérique des transferts thermiques par impact de jet(s) : application aux moteurs aéronautiques*. Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 2001.
- [2] J. M. BUCHLIN : Convective heat transfer in impinging gas jet arrangements. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 4(2):137–149, 2011.
- [3] J. M. BUCHLIN et M. LAPERCHES : Detailed investigation of aerothermal behaviour of confined impinging jet. *QIRT*, 98:258–264, 1998.
- [4] G. M. CARLOMAGNO et A. IANIRO : Thermo-fluid-dynamics of submerged jets impinging at short nozzle-to-plate distance : A review. *Exp. Therm Fluid Sci.*, 58:15–35, oct. 2014.
- [5] F. CHAMPAGNAT, A. PLYER, G. BESNERAIS, B. LECLAIRE, S. DAVOUST et Y. LE SANT : Fast and accurate PIV computation using highly parallel iterative correlation maximization. *Exp. Fluids*, 50(4):1169–1182, mars 2011.
- [6] D. COOPER, D. C. JACKSON, B. E. LAUNDER et G. X. LIAO : Impinging jet studies for turbulence model assessment-I. Flow-field experiments. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 36(10):2675–2684, juil. 1993.
- [7] H. M. HOFMANN, M. KIND et H. MARTIN : Measurements on steady state heat transfer and flow structure and new correlations for heat and mass transfer in submerged impinging jets. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 50(19-20):3957–3965, sept. 2007.
- [8] K. KATAOKA : Impingement heat transfer augmentation due to large scale eddies. *International Heat Transfer Conference 9*, 1, 1990.
- [9] F. MICHELI, M. LAVIEILLE et P. MILLAN : ASSA, un outil de référence pour le traitement du signal en vélocimétrie laser. *In Proc. 10e CFTL, Toulouse (France)*, sept. 2006.
- [10] H. M. NAGIB et K. A. CHAUHAN : Variations of von Kármán coefficient in canonical flows. *Phys. Fluids*, 20(10):101518, oct. 2008.
- [11] P. REULET, D. NORTERSHAUSER et P. MILLAN : Inverse method using infrared thermography for surface temperature and heat flux measurements. *In Proc. 20th ICIASF*, p. 118–126, août 2003.
- [12] M. J. TUMMERS, J. JACOBSE et S. G. VOORBROOD : Turbulent flow in the near field of a round impinging jet. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 54(23-24):4939–4948, nov. 2011.

## Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier Y. Le Sant pour son aide lors de la calibration de la PIV ainsi que F. Micheli, O. Léon, G. Leplat et J.-F. Breil pour leur participation à cette campagne expérimentale.