

# Jet rond en aval d'une contraction brusque

XAVIER GRANDCHAMP<sup>1</sup>, YO FUJISO<sup>1</sup>, ANNEMIE VAN HIRTUM<sup>1</sup>

1. GIPSA-Lab, UMR CNRS 5216, 961 rue de la Houille Blanche BP 46, 38402 GRENOBLE

## Résumé :

*L'influence d'une contraction brusque à arêtes vives couplée à un tube circulaire de faible rapport longueur sur diamètre  $L/D$  sur le développement aval d'un jet en champ proche est étudiée par anémométrie film-chaud pour des nombres de Reynolds modérés ( $1131 < Re_b < 11320$ ). Les profils de vitesse moyenne et turbulente sont quantifiés pour des profils initiaux en sortie du tube et axialement depuis la sortie jusqu'à  $20D$ . On obtient pour  $L/D = 1.2$  un profil de vitesse trapézoïdal, ainsi que l'apparition pour  $1697 \leq Re_b \leq 4527$  d'un pic d'intensité de turbulence à une distance longitudinale  $x/D = 1$  de la sortie.*

## Abstract :

*The influence of an abrupt contraction with sharp edges coupled to low length-to-diameter ratio  $L/D$  circular tube on the downstream near field jet development is investigated by hot-film anemometry for moderate Reynolds numbers ( $1130 < Re_b < 11320$ ). Mean and turbulent velocity profiles are quantified for initial profiles at the tube exit and longitudinal centreline profiles from the tube exit down to  $20D$ . A trapezoid velocity profile is obtained for  $L/D = 1.2$  and for  $1697 \leq Re_b \leq 4527$  a peak of turbulence intensity appears at a longitudinal distance  $x/D = 1$  from the exit.*

**Mots clefs :** jet rond ; contraction brusque ; anémométrie film-chaud

## 1 Introduction

En raison d'un nombre important d'études expérimentales et numériques sur les jets libres ronds, de tels écoulements sont globalement bien compris. Le développement d'un jet turbulent est schématiquement divisé en 3 parties depuis la sortie : une région initiale, une région de transition et une région auto-similaire en champ lointain située plus en aval de l'écoulement [2]. Dans cette 3<sup>ème</sup> zone, l'écoulement de jet axisymétrique est modélisé par une simple équation de décroissance [10]

$$\bar{U}_c(x) = \frac{\bar{U}_0 \cdot K \cdot D}{x - x_0}, \quad (1)$$

où  $\bar{U}_c$  représente la vitesse centrale moyenne,  $\bar{U}_0$  la vitesse centrale moyenne à la sortie,  $K$  le coefficient de décroissance de vitesse centrale et  $x_0$  l'origine virtuelle. Malgré l'universalité du comportement décrit, les paramètres mentionnés ainsi que le développement d'écoulement dépendent fortement des conditions initiales. La plupart des études ont été faites pour des écoulements à nombre de Reynolds élevé ( $10^4$  ou plus, typiques des applications industrielles), et pour des configurations géométriques visant soit une conception optimale de convergent, soit un écoulement dans une conduite de rapport longueur sur diamètre  $L/D > 40$  avec un écoulement d'entrée dans le convergent bien contrôlé. Bien que des études pour des nombres de Reynolds faibles aient aussi été effectuées [1, 9, 7], on dispose de peu d'informations concernant l'influence de la longueur d'extension d'un tube en aval d'une contraction brusque. De telles configurations, *i.e.* à des nombres de Reynolds modérés ( $< 10^4$ ) et de rapport  $L/D \ll 40$  sont en particulier adaptées aux écoulements physiologiques comme l'écoulement d'air dans le conduit vocal qui intervient dans les mécanismes de production de parole [13, 11].

L'objectif de cette étude est par conséquent d'examiner les effets d'une contraction brusque couplée à un tube circulaire en aval pour lequel on fait varier le rapport  $L/D$  pour des écoulements à différents nombres de Reynolds  $Re_b$ , basés sur la vitesse de sortie volumique et le diamètre du tube  $D$  ( $1000 < Re_b < 1.2 \cdot 10^4$ ). Des mesures d'anémométrie film-chaud sont effectuées afin d'évaluer les effets de 2 rapports  $L/D$  différents (1.2 et 53.2), couplés à des angles vifs, pour 19 nombres de Reynolds compris entre 1132 et 11320. Les résultats présentés décrivent les profils initiaux puis les profils longitudinaux de vitesse et d'intensité de turbulence obtenus pour  $0 < x/D < 20$ . Enfin, une analyse qualitative de quelques mesures temporelles est également effectuée.

## 2 Dispositif expérimental

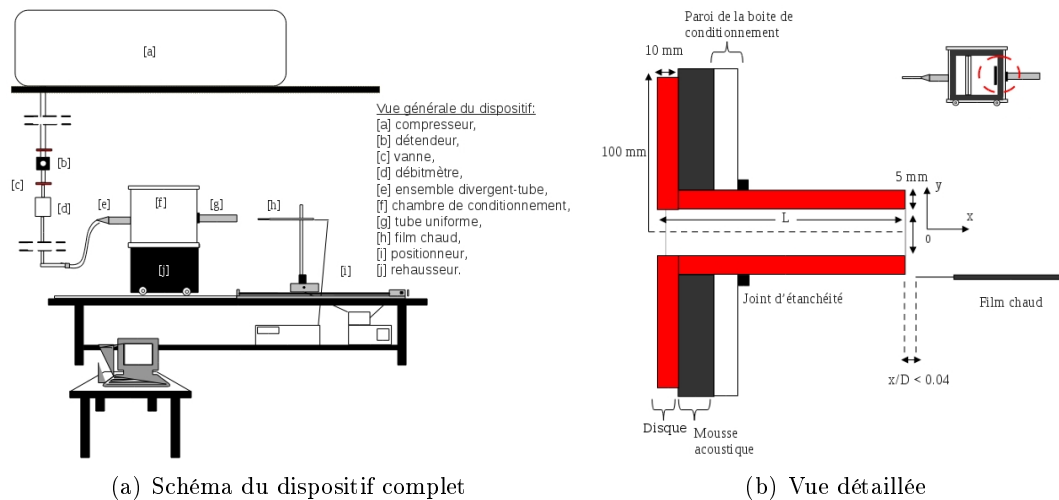


FIGURE 1 – Dispositif expérimental

Un schéma du dispositif expérimental est représenté sur la Fig. 1(a). Le circuit consiste en un compresseur d'air [a], suivi d'un régulateur de pression [b] afin de délivrer un écoulement d'air à pression constante. Le débit volumique est contrôlé par une valve manuelle secondaire [c] placée en aval du régulateur et est mesuré par un débitmètre [d]. Pour homogénéiser l'écoulement, l'installation comprend une chambre de conditionnement [e] de volume  $0.25 \times 0.3 \times 0.35 \text{ m}^3$  dans laquelle est disposée une série de 3 plaques perforées avec des trous de diamètre 1.5 mm. Les parois intérieures de la chambre sont recouvertes de mousse acoustique afin d'atténuer les résonances acoustiques. En aval de la chambre, un tube uniforme [f] de diamètre  $D = 25 \text{ mm}$  et de longueur variable  $L$  est connecté. La présence d'un disque plat à l'entrée du tube permettant de diriger l'air vers le tube impose à l'écoulement une contraction brusque de l'ordre de 80 : 1 depuis la chambre de conditionnement jusqu'à la conduite.

Les débits d'air imposés varient de 20 à 200 L/min par pas de 10 L/min, afin de couvrir une gamme de nombres de Reynolds (basés sur la vitesse débitante et  $D$ )  $10^3 < Re_b < 1.2 \cdot 10^4$ . La vitesse de l'écoulement est mesurée à l'aide d'un film chaud 1201-20 [TSI] [g], de diamètre  $D_f = 50.8 \text{ }\mu\text{m}$  et de longueur de travail  $L_f$  de 1.02 mm, de fréquence de coupure comprise entre 80 et 100 kHz, combiné avec un anémomètre CTA TSI IFA 300 [h]. On échantillonne à 40 kHz durant 4 s pour chaque point. Monté sur un système de positionnement 2D [i], de précision longitudinale 4  $\mu\text{m}$  et transversale 2  $\mu\text{m}$ , le film chaud permet de mesurer les profils de vitesse initiale à une distance  $x/D < 0.04$  de la sortie du tube. Par rapport à un fil chaud, un film chaud est plus résistant, moins facilement déformable, et sa calibration est valable pour une plus grande période d'utilisation [4], c'est pourquoi il est utilisé ici. L'évolution de la vitesse le long de l'axe du tube est quant à elle mesurée pour  $0.04 < x/D < 20$ .

## 3 Résultats des mesures de vitesse

### 3.1 Profils moyens initiaux de vitesse

Les profils de vitesses initiaux pour quelques nombres de Reynolds  $Re_b$  sont reportés sur la Fig. 2(a). Les profils mesurés sont comparés à 3 profils de vitesse empiriques résumés dans la Table 1, avec l'origine

TABLE 1 – Profils empiriques de vitesse, avec  $\bar{U}(y)$  la vitesse moyenne à la position transversale  $y$ ,  $\bar{U}_0$  la vitesse centrale initiale à  $y/D = 0$ ,  $D$  le diamètre du tube, et  $\delta^{**}$  l'épaisseur de quantité de mouvement.

Poiseuille	Loi de puissance $1/7^{\text{ème}}$ [2]	Profil "haut-de-forme"
$\bar{U}(y) = \bar{U}_0 \left[ 1 - \left( \frac{2 y }{D} \right)^2 \right]$	$\bar{U}(y) = \bar{U}_0 \cdot \left( 1 - \frac{2 y }{D} \right)^{1/7}$	$\bar{U}(y) = \frac{1}{2} \cdot \bar{U}_0 \cdot \left[ 1 - \tanh \left[ \frac{1}{4} \cdot \frac{D}{2\delta^{**}} \cdot \left( \frac{2 y }{D} - \frac{D}{2 y } \right) \right] \right]^2$

des vitesses prises sur l'axe du tube : profil parabolique de Poiseuille, profil de loi de puissance  $1/7^{\text{ème}}$  [2] et profil "haut-de-forme" pour lequel l'épaisseur de quantité de mouvement disparaît, *i.e.*  $\delta^{**} = 0$ . En dépit d'une longueur de tube trop courte pour atteindre un développement d'écoulement complet [2], le profil de vitesse pour  $L/D = 53.2$  s'approche pour  $Re_b < 2000$  d'un profil de Poiseuille parabolique décrivant un écoulement de conduite complètement développé [10, 2]. Lorsque  $Re_b$  augmente au-delà de 3000, le profil de vitesse moyenne est modifié, et peut être modélisé pour une large région centrale ( $0 \leq y/D \leq 0.4$ ) par un profil de puissance  $1/7^{\text{ème}}$ . Les profils de vitesse moyenne en sortie pour  $L/D = 1.2$  sont clairement différents des profils correspondants à  $L/D = 53.2$  et leur dépendance au nombre de Reynolds est moins marquée. Pour  $L/D = 1.2$ , la portion centrale de l'écoulement est bien décrite par le profil de vitesse "haut-de-forme". Cependant, la validité de ce modèle est limitée à la région centrale ( $|y/D| < 0.3$ ), et ne permet pas de décrire l'évolution de la vitesse au-delà de cette zone. En effet, la présence en amont d'arêtes vives provoque une importante modification de développement de l'écoulement, insuffisamment atténué par le faible rapport  $L/D = 1.2$ , donnant au profil de vitesse obtenu une forme trapézoïdale.

### 3.2 Profils d'intensité de turbulence centrale initiale

L'intensité de turbulence centrale initiale,  $T_{U,0}(Re_b, L/D)|_{y/D=0, x/D=0}$ , est analysée sur la Fig. 2(b) en fonction de  $Re_b$  et  $L/D$ . Les valeurs obtenues pour tous les Reynolds évalués sont reportées. Pour les 2 rapports  $L/D$ , un pic est observé dans la gamme  $2000 < Re_b < 4000$ . Pour les Reynolds plus élevés,  $T_{U,0}$  diminue et converge vers une valeur asymptotique. Si la diminution dans l'intensité de turbulence a été observée dans les travaux de Todde *et al.* [12] pour un jet issu d'une buse régulière et des Reynolds dans la gamme  $800 < Re_b < 7000$ , l'existence d'un pic turbulent est propre à cette étude. Bien que la raison n'est pas clairement identifiée, la présence des arêtes vives en amont a une très forte influence sur la dépendance au nombre de Reynolds dans la zone de transition  $2000 < Re_b < 4000$ .

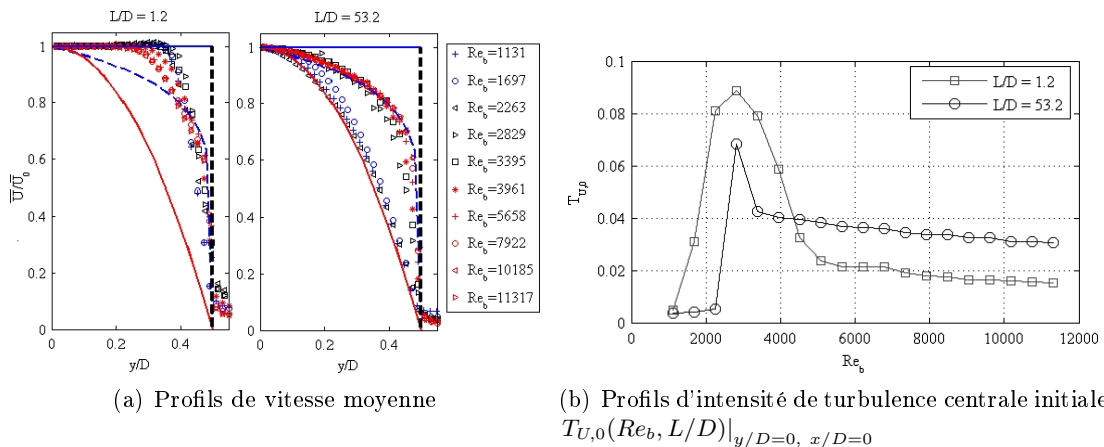


FIGURE 2 – Profils pour  $L/D = \{1.2 ; 53.2\}$  et  $Re_b = \{1132 ; 1697 ; 2263 ; 2824 ; 3961 ; 4527 ; 5658 ; 7922 ; 10185 ; 11317\}$

### 3.3 Profil longitudinal de vitesse centrale

La Fig. 3 représente l'évolution de la vitesse centrale moyenne  $\bar{U}_c(x, y/D = 0)$  normalisée par la vitesse centrale initiale  $\bar{U}_0(x, y/D = 0)$  dans la région  $0 < x/D < 5$ . Une différence évidente dans la vitesse

centrale en champ proche entre  $L/D = 1.2$  et  $53.2$  apparaît. Pour  $L/D = 53.2$ , la vitesse centrale moyenne n'est pas maintenue constante dans la région du noyau. À la place, la vitesse centrale décroît continuellement pour tous les Reynolds. La vitesse est habituellement uniforme jusqu'à la région de décroissance [5, 3, 6, 8]. Le rapport  $L/D = 1.2$  présente une évolution spatiale singulière avec une décroissance en vitesse prononcée en sortie du tube, suivie plus en amont par une zone de vitesse constante. La réduction de vitesse semble varier avec le nombre de Reynolds à partir d'environ 6 % de la vitesse centrale initiale  $\bar{U}_0$  à  $Re_b = 1698$  jusque 1 % pour des Reynolds  $Re_b \geq 4527$ . Ce résultat est proche de celui de Todde *et al.* [12] qui ont trouvé un comportement similaire pour des jets ronds issus d'une géométrie de convergent régulière pour des Reynolds de la gamme  $1620 < Re_b < 4050$ . L'influence des tourbillons environnants induite par l'auto-excitation provoquée par la contraction d'écoulement peut expliquer une telle variation dans la vitesse de l'écoulement.

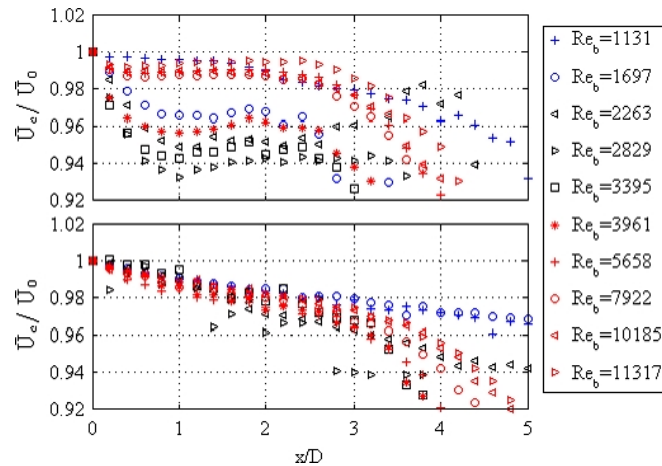


FIGURE 3 – Vitesse centrale normalisée dans le champ proche en aval ( $0 < x/D < 5$ ) pour  $L/D = 1.2$  (haut) et  $L/D = 53.2$  (bas) pour  $Re_b = \{1132 ; 1697 ; 2263 ; 2824 ; 3961 ; 4527 ; 5658 ; 7922 ; 10185 ; 11317\}$ .

### 3.4 Profil longitudinal d'intensité de turbulence

La Fig. 4 présente une vue globale de l'intensité de turbulence  $T_U$  le long de l'axe du jet pour tous les Reynolds évalués. Pour les bas Reynolds ( $1132 < Re_b < 4527$ ) un pic d'intensité de turbulence bien défini est observé pour  $L/D = 1.2$ , tandis qu'un tel phénomène est absent pour  $L/D = 53.2$ . Afin de faciliter la description, la zone  $L/D = 1.2$  dans la gamme  $1132 \leq Re_b \leq 4527$  est zoomée sur la Fig. 4. Le pic d'intensité de turbulence apparaît clairement pour  $Re_b = 1697$  à une position aval  $x/D \approx 0.7$ . Lorsque  $Re_b$  augmente jusque  $Re_b = 2829$ , le pic d'intensité augmente aussi et sa position sur la ligne centrale est décalée en aval jusque  $x/D \approx 1$ . Pour  $2829 < Re_b \leq 4527$ , le pic d'intensité se réduit sans changement notable le long de la ligne centrale. Pour  $Re_b > 4527$ , le pic disparaît complètement. La présence de pic dans l'intensité de turbulence longitudinale a été observée précédemment par Todde *et al.* [12]. Néanmoins la position aval du pic de turbulence dans cette précédente étude a été reportée à  $x/D \approx 4.5$ , et elle s'intensifie continuellement avec le nombre de Reynolds jusque  $Re_b > 6750$ . La couche limite s'épaissit avec le nombre de Reynolds à partir de  $\delta_{95} = 0.1D$  pour  $Re_b = 2258$  jusque  $\delta_{95} = 0.2D$  pour des Reynolds plus élevés. En comparaison, l'épaisseur de couche limite ne varie pas dans l'étude de Todde *et al.* [12].

## 4 Résultats des mesures temporelles

Le comportement de jet est maintenant analysé à travers les mesures temporelles du signal de vitesse centrale. Les Figs. 5(a) et 5(b) montrent des séquences de 0.5 s du signal de vitesse à 3 positions aval  $x/D = \{0 ; 1 ; 6\}$ , pour 4 nombres de Reynolds  $Re_b = \{1132 ; 1697 ; 2263 ; 11317\}$ , respectivement pour  $L/D = \{1.2 ; 53.2\}$ . Le signal temporel de vitesse pour  $L/D = 1.2$  fait apparaître pour  $Re_b = 1132$  une fluctuation quasi-sinusoïdale de  $x/D = 0$  à  $x/D = 1$ , qui disparaît pour  $x/D = 5$ . Cette

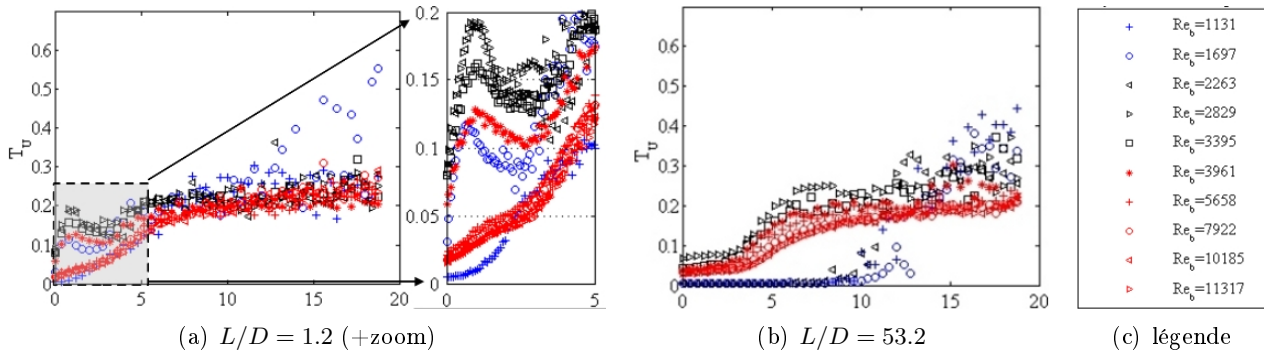


FIGURE 4 – Intensité de turbulence centrale  $T_U$  en fonction de  $x/D$  pour  $Re_b = \{1132 ; 1697 ; 2263 ; 2824 ; 3961 ; 4527 ; 5658 ; 7922 ; 10185 ; 11317\}$

évolution temporelle est similaire à celle obtenue par Todde *et al* [12], où ce résultat a été interprété comme "l'empreinte de tourbillons discrets dans la couche de cisaillement du jet". Pour  $Re_b = 1697$  et  $Re_b = 2263$  une forte fluctuation régulière est directement obtenue à  $x/D = 0$  et  $x/D = 1$  avant de disparaître à  $x/D = 5$  où le signal résultant exhibe une variation similaire à celle pour  $Re_b = 1132$ .

Cette importante fluctuation dans le signal de vitesse directement en sortie du tube a d'abord été interprétée comme un forçage du système d'alimentation d'air. En raison de la présence de mousse acoustiques et de grilles dans la chambre de conditionnement (cf. section 2), et du fait que la salle d'expérimentation est isolée du compresseur, cette hypothèse n'a pas été retenue. De plus, cette régularité dans la vitesse à  $x/D = 0$  n'est pas présente pour les 2 Reynolds extrêmes  $Re_b = 1132$  et  $Re_b = 11317$ , ainsi que dans le cas  $L/D = 53.2$  pour tous les Reynolds (Fig. 5(b)). Ainsi, la présence de cette particularité dans le signal de vitesse est la conséquence d'une perturbation amont le long de la ligne centrale. La différence avec les précédentes études traitant de jet rond libre est spécifique à la configuration de la buse, où une contraction brusque est imposée avec des arêtes vives. Ce choix entraîne la formation d'un profil de vitesse de sortie de forme trapézoïdale, et de profils d'intensité de turbulence particuliers dans le cas  $L/D = 1.2$  (Fig. 2(a)), qui sont la conséquence de la contraction brusque provoquant la formation de tourbillons en amont de la sortie du tube.

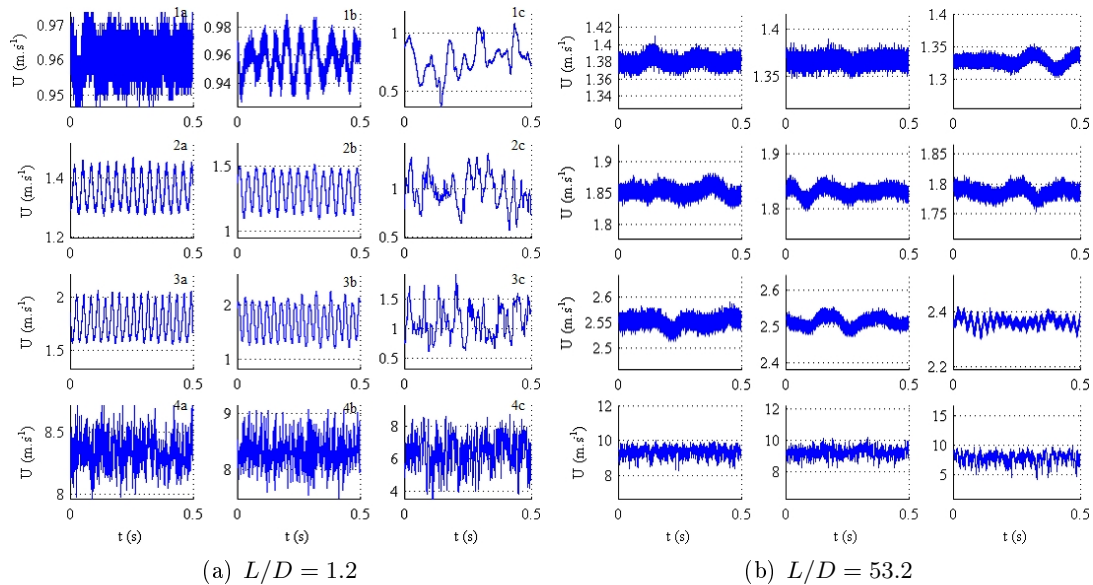


FIGURE 5 – Séquences de 0.5 s du signal de vitesse pour  $Re_b = \{1132 ; 1697 ; 2263 ; 11317\}$  (de haut en bas) et 3 positions aval  $x/D = \{1 ; 2 ; 5\}$  (de gauche à droite).

## 5 Conclusion

Des mesures film-chaud ont été réalisées sur un écoulement de jet issu d'une contraction brusque à arêtes vives couplée à plusieurs rapports longueur sur diamètre  $L/D = \{1.2 ; 53.2\}$ . Le développement de l'écoulement en champ proche ( $x/D < 20$ ) a été étudié pour des nombres de Reynolds modérés ( $1132 < Re_b < 11320$ ). Malgré des différences significatives entre les rapports  $L/D$  évalués, des similarités dans le comportement global du jet sont constatées :

- L'intensité de turbulence centrale initiale est décomposée en 2 régimes en fonction de  $Re_b$ . Pour  $1132 < Re_b < 2200$ , elle augmente avec  $Re_b$  avant de diminuer continuellement pour des Reynolds plus élevés vers une valeur asymptotique comme constaté dans la littérature.

Cependant, le rapport  $L/D$  du tube en aval couplé à des arêtes vives provoque d'importants effets :

- Le profil moyen initial de vitesse à la sortie du tube passe d'un profil de Poiseuille à un profil de loi de puissance  $1/7^{\text{ème}}$  lorsque  $Re_b$  augmente, pour  $L/D = 53.2$ . Pour  $L/D = 1.2$ , un profil trapézoïdal est généré à la sortie du tube pour tous les Reynolds évalués.
- Le profil longitudinal d'intensité de turbulence en sortie de tube varie de manière complexe pour  $L/D = 1.2$ , avec la présence d'un pic d'intensité de turbulence dont la position est proche de  $x/D = 1$ .
- Pour  $L/D = 1.2$ , la vitesse longitudinale moyenne de jet en champ proche ( $0 < x/D < 5$ ) montre un comportement singulier avec une évolution de vitesse décomposée en 2 phases : une forte diminution de vitesse suivie d'une portion à vitesse constante. En parallèle, l'intensité de turbulence  $T_U$  présente un pic d'intensité pour  $1620 \leq Re_b \leq 4527$ . L'observation de tels phénomènes est similaire à celle de Todde *et al* [12], où le jet est issu d'une buse convergente régulière. Pour  $L/D = 53.2$ , la vitesse centrale moyenne diminue lentement et continuellement, sans pic dans l'intensité de turbulence.

## Références

- [1] A.A. Abdel-Rahman, S.F. Al-Fahed, and W. Chakroun. The near-field characteristics of circular jets at low Reynolds numbers. *Mechanics Research Communications*, 23(3):313–324, 1996.
- [2] R.D. Blevins. Applied fluid dynamics handbook. 1984.
- [3] L. Boguslawski and C.O. Popiel. Flow structure of the free round turbulent jet in the initial region. *Journal of Fluid Mechanics*, 90(03):531–539, 1979.
- [4] H.H. Brunn. Hot-wire anemometry, 1995.
- [5] S.C. Crow and F.H. Champagne. Orderly structure in jet turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 48(03):547–591, 1971.
- [6] H.J. Hussein, S.P. Capp, and W.K. George. Velocity measurements in a high-Reynolds-number, momentum-conserving, axisymmetric, turbulent jet. *Journal of Fluid Mechanics*, 258:31–75, 1994.
- [7] S.J. Kwon and I.W. Seo. Reynolds number effects on the behavior of a non-buoyant round jet. *Experiments in Fluids*, 38(6):801–812, 2005.
- [8] J. Mi, DS Nobes, and G.J. Nathan. Influence of jet exit conditions on the passive scalar field of an axisymmetric free jet. *Journal of Fluid Mechanics*, 432:91–125, 2001.
- [9] P. O'Neill, J. Soria, and D. Honnery. The stability of low Reynolds number round jets. *Experiments in Fluids*, 36(3):473–483, 2004.
- [10] H. Schlichting, K. Gersten, and K. Gersten. *Boundary-layer theory*. Springer Verlag, 2000.
- [11] C.H. Shadle. *The acoustics of fricative consonants*. Massachusetts Institute of Technology, Research Laboratory of Electronics, 1985.
- [12] V. Todde, P.G. Spazzini, and M. Sandberg. Experimental analysis of low-Reynolds number free jets. *Experiments in fluids*, 47(2):279–294, 2009.
- [13] A. Van Hirtum, X. Grandchamp, and X. Pelorson. Moderate Reynolds number axisymmetric jet development downstream an extended conical diffuser: Influence of extension length. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 28(6):753–760, 2009.