



**HAL**  
open science

# Mesure tridimensionnelle d'un écoulement en charge en aval d'une singularité : méthode Shake The Box (STB) non résolue en temps

Bilal Ben Haroual, Didier Boldo, Emmanuel Thibert, Eric Nanteau, Julie Albagnac, Romain Mathis

## ► To cite this version:

Bilal Ben Haroual, Didier Boldo, Emmanuel Thibert, Eric Nanteau, Julie Albagnac, et al.. Mesure tridimensionnelle d'un écoulement en charge en aval d'une singularité : méthode Shake The Box (STB) non résolue en temps. 25e Congrès Français de Mécanique, Nantes, 29 août-2 septembre 2022, Aug 2022, Nantes, France. hal-04280055

**HAL Id: hal-04280055**

**<https://hal.science/hal-04280055v1>**

Submitted on 10 Nov 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Mesure tridimensionnelle d'un écoulement en charge en aval d'une singularité : méthode Shake The Box (STB) non résolue en temps

**B. BEN HAROUAL<sup>a,b</sup>, D. BOLDO<sup>a</sup>, E. THIBERT<sup>a</sup>, E. NANTEAU<sup>a</sup>  
J. ALBAGNAC<sup>b</sup>, R. MATHIS<sup>b</sup>**

a. EDF R&D Chatou, Ile de France - France

b. Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT), Université de Toulouse, CNRS, Toulouse - France

Email auteur correspondant : bilal.benharoual@toulouse-inp.fr

## Résumé :

*Le présent travail s'inscrit dans un projet de recherche qui s'intéresse aux écoulements turbulents en aval de singularités (comme un simple coude ou un double coude coplanaire en S). L'objectif de cette étude est d'appréhender l'écoulement aux endroits où les débitmètres industriels sont installés dans le but d'améliorer leur précision métrologique. Cet article présente les résultats des premiers essais de vélocimétrie laser, plus précisément la méthode Shake The Box multi pulse, menés sur un banc d'essai de EDF R&D à Chatou. Les essais ont conduit à la reconstruction des champs de vitesse pour différents débits de commande et à deux stations de mesure différentes en aval de la singularité étudiée.*

## Abstract :

*The present work is part of a research project that deals with turbulent flows downstream pipe installation elements, for instance a 90° bend or an S-shaped double bend. The aim of this study is to reach a better understanding of the turbulent flows where industrial flowmeters are installed in order to enhance their accuracy. This article shows the first results of the experimental work done at EDF R&D's test bed using the multi-pulse Shake The Box technique. The conducted experiments have provided velocity fields for multiple flow rates at two different locations downstream the investigated installation.*

**Mots clefs : Singularité, Débit, Vélocimétrie laser**

## 1 Introduction

Dans les unités de production électronucléaires, les échanges thermiques entre systèmes élémentaires sont principalement quantifiés par des mesures thermo-hydrauliques (débit, température et pression). La maîtrise de leur représentativité physique et incertitude constitue un enjeu fort tant en termes de sûreté, d'impact environnemental que de performance (efficacité énergétique).

Nous nous intéressons ici aux mesures industrielles de débit qui peuvent être réalisées grâce à des technologies variées : débitmètre électromagnétique, débitmètre à ultrasons, utilisation d'organes déprimogènes, *etc.* Ces technologies de mesure, bien que potentiellement très différentes dans leur principe de fonctionnement, présentent toutes une sensibilité, plus ou moins importante, au profil de vitesse à l'endroit de leur mise en œuvre. La représentativité de la mesure est nominale quand les appareils de mesure sont installés dans des zones où le champ de vitesse est pleinement développé, c'est-à-dire des zones situées en aval d'importantes longueurs droites de tuyauterie où l'écoulement turbulent est établi et axisymétrique. Cette condition est rarement satisfaite pour les applications industrielles du fait de la présence de singularités multiples et variées le long des circuits (simple coude, double coude, té, évasement de section, vanne, *etc.*). Appréhender le profil de vitesse à l'endroit de l'implantation d'un débitmètre, quel qu'il soit, permettrait donc d'améliorer sa performance métrologique et de réduire son incertitude de mesure.

À cet effet, une boucle d'essais de EDF R&D à Chatou a été dotée d'un laser double cavité et de quatre caméras afin de mener des expériences de vélocimétrie laser en aval de différents types de singularités. Une manchette de visualisation de l'écoulement a été construite sur mesure pour atténuer au mieux les déformations optiques.

Dans un premier lieu, seront décrits les effets d'une conduite courbée sur l'écoulement en charge, en mettant l'accent sur les effets d'un coude à  $90^\circ$ . Dans un second lieu, sera présenté le dispositif expérimental. Ensuite, les résultats des essais seront exposés. Finalement, une conclusion sera proposée.

## 2 Effets d'une conduite courbée sur un écoulement en charge

Les premières observations et études concernant les effets d'une courbure sur un écoulement ont été faites sur des écoulements à surface libre au XIX<sup>e</sup> siècle. En effet, un changement de direction dans une rivière par exemple [1][2] met en évidence, de manière visuelle, des phénomènes physiques qui viennent modifier la dynamique de l'écoulement.

Il a fallu attendre le début du XX<sup>e</sup> siècle pour s'intéresser aux effets d'une conduite courbée sur un écoulement en charge. En effet, en 1902, Williams *et al.* [3] ont remarqué que la vitesse maximale dans une conduite courbée est décalée du centre de celle-ci.

Ce n'est qu'en 1911 que la première expérience élaborée spécialement pour étudier les effets des conduites courbées sur un écoulement en charge voit le jour. Eustice [4], observe une dynamique d'écoulement qui est différente de celle connue pour les conduites droites, et cette dynamique change en fonction du rayon de courbure  $Rc$  de la conduite. L'expérience s'apparente à celle effectuée par Reynolds, où la visualisation des lignes de courant est effectuée à l'aide d'un colorant injecté en amont, dans des conduites transparentes avec différentes courbures.

Ces premières expériences ont mis en évidence la manifestation d'une force centrifuge qui s'exerce sur le fluide : lors de son passage par la portion courbée, il est projeté vers l'extrados de la conduite avant de revenir progressivement au centre en passant par l'intrados. De ce mouvement découle un écoulement transverse dit écoulement secondaire. Les variations des vitesses et des pressions sont qualitativement discutées par Eustice dans ses travaux. Ces expériences étaient limitées pour le régime laminaire, le mélange en régime turbulent ne permettant plus le suivi des filaments colorés. Ceci représentait un grand obstacle et explique le manque des expériences pour les écoulements en régime turbulent, qui ne seront

étudiés expérimentalement que plus tard au XX<sup>e</sup> siècle à l'aide d'outils intrusifs, *e.g.* un fil chaud [5], et que récemment avec des outils plus évolués et non intrusifs telles les techniques laser, *e.g.* LDV [6].

Dean [7][8] a démontré théoriquement que l'écoulement secondaire surgit sous forme de deux tourbillons symétriques contra-rotatifs. Ses travaux ont suscité l'intérêt des chercheurs pour ce type d'écoulements, ce qui a permis à plusieurs études théoriques et expérimentales de suivre dans le but de mieux comprendre les phénomènes physiques liés aux effets d'une conduite courbée, notamment pour le cas de figure d'un coude à 90° qui représente une singularité d'intérêt, très répandue dans les circuits industriels.

De manière globale, les différentes études menées sur l'effet d'un coude à 90° sur l'écoulement s'accordent sur la manière dont l'écoulement secondaire est généré depuis l'entrée du coude jusqu'à sa sortie (donc de 0° à 90°). L'analyse de Sudo *et al.* [9] par exemple, décrit les différentes étapes du passage du fluide à travers le coude, et la Figure 1 illustre cette dynamique.

A l'entrée du coude, le fluide est accéléré au niveau de l'intrados (la paroi interne) suite à une diminution de la pression, tandis que l'augmentation de celle-ci au niveau de l'extrados (la paroi externe) ralentit l'écoulement. Il en découle une circulation transversale du fluide de la paroi externe vers la paroi interne : premier écoulement secondaire. À 30° de l'entrée du coude, la force centrifuge devient très importante et engendre dans la section transversale un deuxième écoulement secondaire sous forme de deux tourbillons contrarotatifs : les tourbillons de Dean. Ici le fluide est toujours plus rapide au niveau de l'intrados. À 60°, l'écoulement accélère au niveau de l'extrados et ralentit au niveau de l'intrados pour deux raisons : 1/ la pression diminue au niveau de la paroi externe tandis qu'elle augmente au niveau de la paroi interne 2/ l'écoulement secondaire causé par la force centrifuge gagne en amplitude et les tourbillons de Dean transportent les particules de fluide rapides de l'intérieur vers l'extérieur et inversement pour les particules lentes. Ce phénomène s'amplifie jusqu'à la sortie du coude : l'écoulement devient plus rapide à l'extrados et l'écoulement secondaire cause une déformation des profils de vitesse.

En aval du coude, l'écoulement secondaire persiste sur une distance de plusieurs dizaines de diamètres hydrauliques, et le champ de vitesse axiale s'affranchit progressivement de ses irrégularités pour tendre vers un champ axisymétrique.

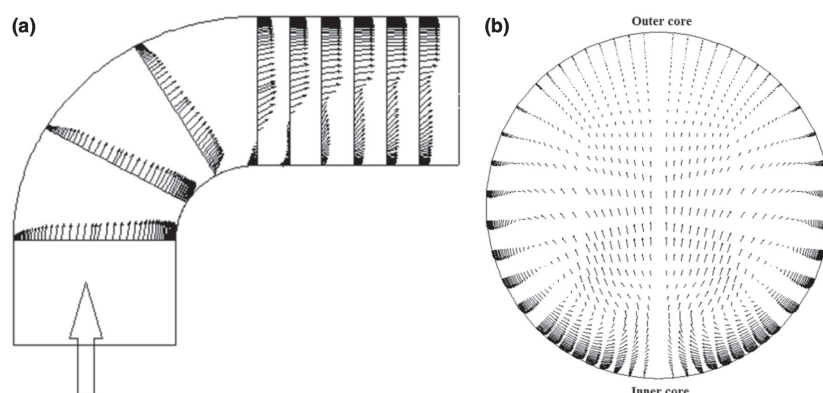


FIGURE 1 – Écoulement à travers un coude 90° : vecteurs vitesses normalisés. (a) plan de symétrie (b) section à 90°. Extrait de Dutta *et al.* [10]

### 3 Dispositif expérimental

#### 3.1 Boucle d'essai Mont Blanc



Partie principale : débitmètres de référence et tuyauterie



Partie souterraine : cuve d'eau, pompe et échangeur

FIGURE 2 – Boucle Mont Blanc. EDF R&amp;D, Chatou-Ile de France.

Les mesures de vélocimétrie sont réalisées sur la boucle d'essai Mont Blanc de EDF R&D à Chatou en Île de France. Il s'agit d'un circuit hydraulique en charge et en boucle fermée, régulé en débit, en pression et en température. Ce banc d'essai permet de reproduire, à échelle réduite, différentes configurations rencontrées sur des circuits industriels. La boucle a été développée à des fins de caractérisation de débitmètres industriels : évaluations métrologiques, étalonnages, *etc.* Le banc est composée de tuyauteries en acier inoxydable d'un diamètre hydraulique  $D_N = 2R = 110$  mm, et permet de couvrir une large gamme de débits allant jusqu'à  $Q = 150$  m<sup>3</sup>/h. Afin de mettre en place différentes métrologies de mesure optique sur le banc d'essai, ce dernier a été doté d'une manchette en plexiglas, dite Hippo 2.0, ayant une forme très particulière comme illustré sur la Figure 3. La manchette a été conçue afin de limiter les distorsions optiques tout en offrant une solution compacte, *i.e.* qui permet de s'affranchir du déploiement d'un tronçon cylindrique immergé dans une boîte de visualisation munie de prismes. En outre, la solution adoptée permet de modifier, assez facilement, les configurations d'essais.



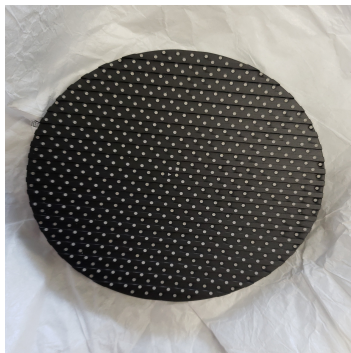
FIGURE 3 – Manchette Hippo 2.0

#### 3.2 Matériel de vélocimétrie laser

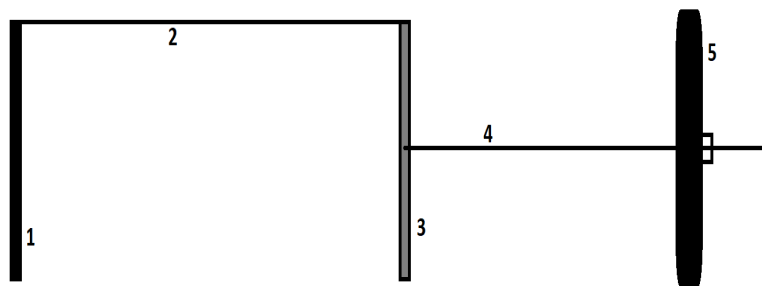
Pour réaliser des mesures directes des champs de vitesse 3D3C nous utilisons un suivi de particules à travers le module Shake The Box (STB) multi pulse (non résolu en temps) [11][12] fourni par LaVision. Pour ces expériences de vélocimétrie laser, le matériel utilisé se compose d'un laser Nd : YAG (532 nm) à double cavité, quatre caméras 6Mpixels montées sur des supports Scheimpflug, des particules fluorescentes d'une taille moyenne de 30  $\mu$ m et des filtres adaptés montés sur les objectifs des caméras.

Les quatre caméras sont agencées de manière à ce que chacun des axes optiques soit orthogonal à l'une des quatre facettes de la manchette illustrée sur la Figure 3. La facette supérieure (respectivement inférieure) de la manchette fait un angle de  $22,5^\circ$  (respectivement  $-22,5^\circ$ ) avec le plan horizontal de symétrie de la manchette, qui correspond à un plan diamétral de la conduite. La facette amont (respectivement aval) fait un angle de  $45^\circ$  (respectivement  $-45^\circ$ ) avec le plan vertical de symétrie de la manchette, qui correspond à un plan transversal de la conduite.

Une mire de calibration bi-planaire circulaire (voir Figure 4), spécialement conçue pour le banc expérimental de la présente étude, est directement insérée dans la manchette Hippo 2.0 pour réaliser la première passe de la calibration in-situ. Il s'en suit, grâce au logiciel de traitement DaVis, le calcul de la fonction de transfert qui permet la reconstruction des positions 3D des particules à partir des quatre images prises par les quatre caméras.



(a) Mire de calibration 3D



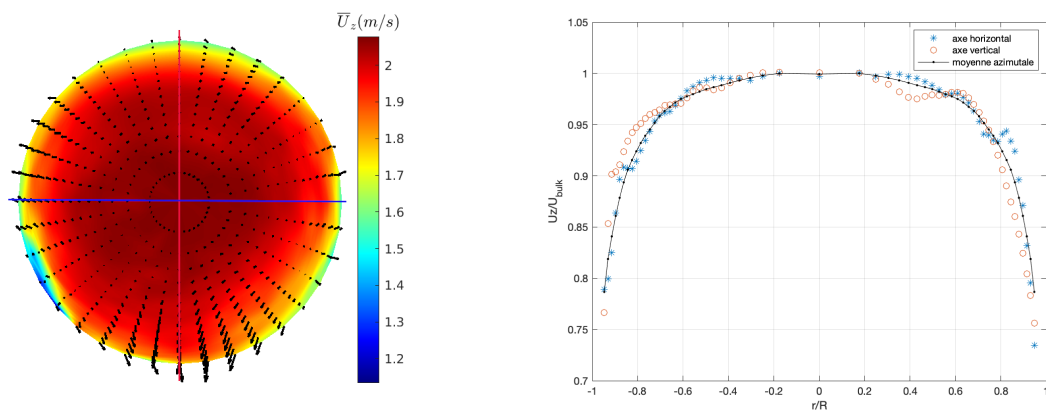
(b) 1. Mire, 2. Tige rectangulaire fine en INOX, 3. Pièce rigide en aluminium, 4. Tige, 5. Bouchon clamp.

FIGURE 4 – Dispositif de calibration pour les essais STB

## 4 Résultats et discussion

Trois configurations ont été considérées pour les essais de STB effectués sur la boucle Mont blanc : une première en longueur droite, une deuxième en aval d'un simple coude, et une dernière en aval d'un double coude coplanaire en S (les deux coudes étant séparés d'une distance égale à  $5D_N$ ). Les coudes utilisés ont un angle de cintrage de  $90^\circ$  et un rayon de courbure  $R_c = 1.5D_N$ . Les essais ont été effectués à deux stations de mesures en aval des singularités : à  $3.5D_N$  et à  $10D_N$ . Les expériences ont été menées pour six nombres de Reynolds allant de  $Re = 9005$  à  $Re = 540350$ , les résultats présentés ci-dessous correspondent au nombre de Reynolds  $Re = 252160$ , équivalent à un débit de commande  $Q_{ref} = 70 \text{ m}^3/\text{h}$ . Les résultats présentés ci-dessous, correspondent à une reconstruction du champ de vitesse 3D3C sur une section de diamètre  $D = 106 \text{ mm}$ . Les 2 mm proche parois n'étaient pas exploitables à cause des fortes déformations optiques qui ne pouvaient pas être corrigées. Sur les figures des champs de vitesse, le repère est orthogonal avec  $Oz$ , l'axe de l'écoulement, sortant du support. Les profils de la vitesse axiale sont adimensionnés par  $U_{bulk}$  : la vitesse maximale en configuration longueur droite.

## 4.1 Longueur droite



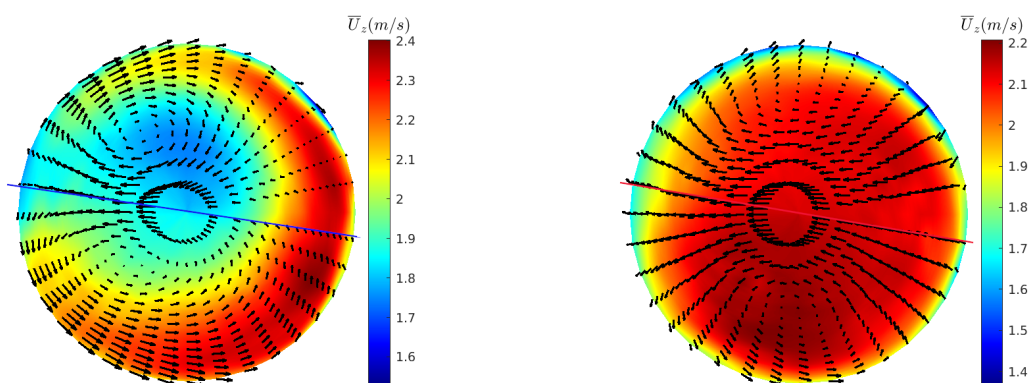
(a) Isocontours de la vitesse axiale  $\bar{U}_z$  et les vecteurs  $U(r, \theta)$  (b) Profils adimensionnés de  $\bar{U}_z$  sur les axes horizontal (bleu) et vertical (rouge)

FIGURE 5 – Configuration longueur droite

Cette mesure a été effectuée à une distance de  $40D_N$  en aval d'un redresseur d'écoulement, cette même distance a été retenue en amont des singularités étudiées.

Le champ de vitesse axiale obtenu montre qu'à l'endroit où les mesures sont effectuées, l'écoulement est pleinement développé, axisymétrique en moyenne comme illustré sur la Figure 5. Les vitesses transverses, également illustrées sur la Figure 5a, témoignent de l'absence d'un écoulement au niveau de la section, ce qui montre que l'écoulement est principalement axial. Le montage expérimental étant imparfait (raccordement de plusieurs tronçons, présence de joints *etc.*), les profils tracés le long des axes de symétrie de la conduite ne se superposent pas, et des petites variations de la vitesse sont notables.

## 4.2 Simple coude



(a) Isocontours de la vitesse axiale  $\bar{U}_z$  et les vecteurs  $U(r, \theta)$  à  $3.5D_N$  (b) Isocontours de la vitesse axiale  $\bar{U}_z$  et les vecteurs  $U(r, \theta)$  à  $10D_N$

FIGURE 6 – Champs de la vitesse axiale (m/s) et les vitesses transverses.

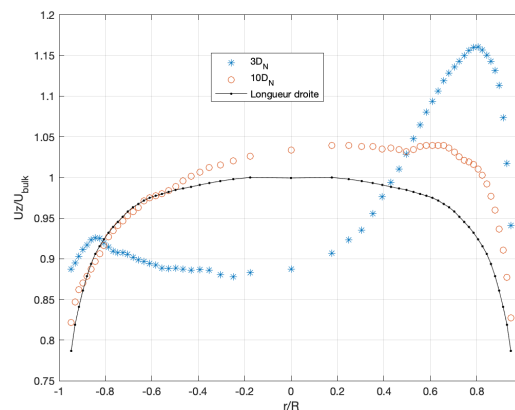


FIGURE 7 – Profils adimensionnés de  $\overline{U}_z$  sur les axes de symétrie de l'écoulement

Le champ de vitesse axiale obtenu à  $3.5D_N$  de la sortie du coude rejoint l'analyse faite à la section 2 sur l'effet d'un coude à  $90^\circ$  sur l'écoulement en charge. La survitesse au niveau de l'extrados du coude est toujours notable à  $3.5D_N$  comme le montre la Figure 6a. Les vitesses transverses illustrées sur la même figure témoignent de l'existence d'un écoulement secondaire suite au passage du fluide par le coude : on retrouve les deux tourbillons contrarotatifs de Dean.

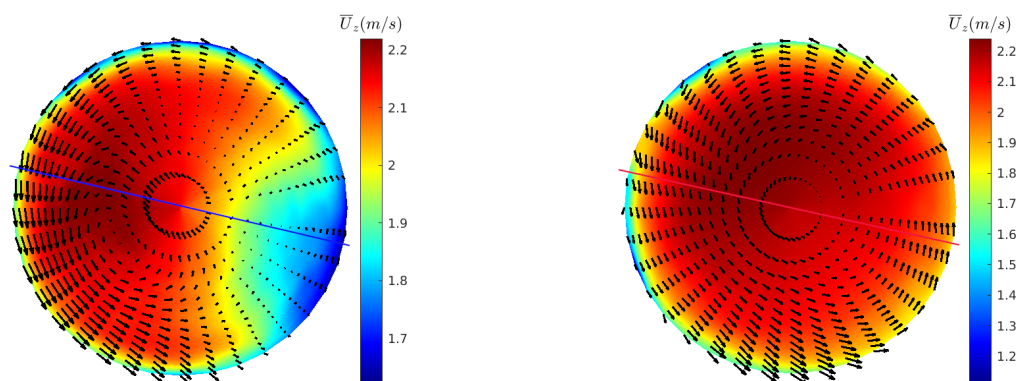
La Figure 6b montre que l'écoulement axial, à  $10D_N$  de la sortie du coude, récupère progressivement un aspect pleinement développé avec un étalement de la survitesse précédemment notée. Cela dit, la reconstruction 3D3C permet de voir que l'écoulement secondaire persiste toujours avec des structures tourbillonnaires au niveau de la section.

Ces observations sont validées par les profils de la vitesse axiale le long des axes de symétrie de l'écoulement comme illustré sur la Figure 7.

La Figure 6 montre également que l'axe de symétrie de l'écoulement ne coïncide pas exactement avec l'axe horizontal de la tuyauterie, et nous supposons que cela est dû, soit au phénomène du *swirl-switching* [13], soit à une instabilité causée par un désaxage de 3mm entre le coude et la tuyauterie montée en amont. Ce désaxage a été mis en évidence par un scan 3D du montage.



### 4.3 Double coude



(a) Isocontours de la vitesse axiale  $\bar{U}_z$  et les vecteurs  $U(r, \theta)$  à  $3.5D_N$  (b) Isocontours de la vitesse axiale  $\bar{U}_z$  et les vecteurs  $U(r, \theta)$  à  $10D_N$

FIGURE 8 – Champs de la vitesse axiale (m/s) et les vitesses transverses.

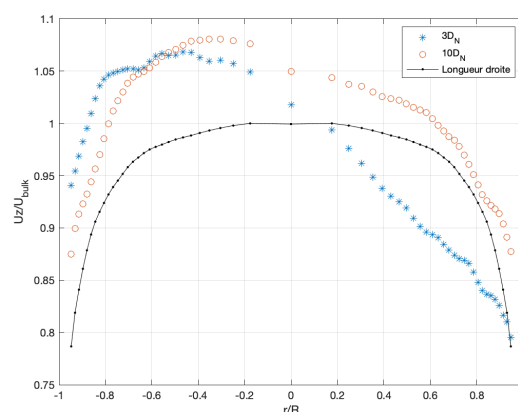


FIGURE 9 – Profils adimensionnés de  $\bar{U}_z$  sur les axes de symétrie de l'écoulement

Le champ de vitesse axiale obtenu en sortie d'un double coude coplanaire en S présente une survitesse au niveau de l'intrados du deuxième coude, comme illustré sur la Figure 8a. Le champ de vitesse en entrée du second coude s'apparente au champ de vitesse inversé de la figure 6a : l'écoulement présente déjà une survitesse importante sur la partie interne du second coude. Ce dernier transporte une partie du fluide accéléré de l'intrados vers l'extrados, d'où l'étalement de la zone accéléré en sortie, en comparaison avec la zone accéléré en sortie d'un simple coude qui a la forme d'un croissant très excentré. Le double coude génère un écoulement secondaire caractérisé par une structure cohérente de la taille de la section. Le centre du tourbillon est légèrement décentré par rapport au centre de la conduite comme le montre la Figure 8a. À  $10D_N$  de la sortie du double coude, l'écoulement axial tend vers un champ pleinement développé avec toujours une légère survitesse. L'écoulement secondaire continue de se propager avec cette fois-ci un tourbillon de la taille de la section et centré en celle-ci.

La Figure 9 permet de tirer les mêmes conclusions concernant la vitesse axiale. Les profils adimensionnés par  $U_{bulk}$ , tracés le long des axes de symétrie de l'écoulement, mettent en évidence la survitesse au

niveau de la partie interne de la tuyauterie et le retour progressif à  $10D_N$  à un écoulement pleinement développé : le gradient radial de la vitesse est moins fort que celui constaté à  $3.5D_N$ .

## 5 Conclusion

Ce travail présente les premiers essais de Shake The Box multi-pulse pour une reconstruction de champs des vitesses 3D3C d'un écoulement d'eau en aval de singularités type coude.

L'étude a porté sur la caractérisation des champs moyens de la vitesse axiale, mesure d'intérêt pour les débitmètres industriels. Elle a également mis en évidence l'existence de structures cohérentes qui déforment l'écoulement et le rendent tridimensionnel, ces structures tourbillonnaires se propagent et restent toujours visibles à  $10D_N$  de la sortie de la singularité.

La suite du travail consiste à caractériser l'écoulement turbulent, à estimer les incertitudes des mesures liées au matériel utilisé et au module STB non résolu en temps, et à effectuer des comparaisons entre les essais expérimentaux présentés ci-dessus et des simulations numériques en prenant en compte la géométrie exacte du montage expérimental.

## Références

- [1] J. Thomson (1877), V. On the origin of windings of rivers in alluvial plains, with remarks on the flow of water round bends in pipes, 25(171) 5-8.
- [2] J. Thomson (1878), VI. Experimental demonstration in respect to the origin windings of rivers in alluvial plains, and to the mode flow of water round bends of pipes, 26(179) 356-357.
- [3] G.S Williams, C.W Hubbell & G.H Fenkell (1902), Experiments at Detroit, Mich., On the effect of curvature upon the flow of water in pipes, 47(1) 1-196.
- [4] J. Eustice (1911), Experiments on stream-line motion in curved pipes, 85(576) 119-131.
- [5] M.J Tunstall & J.K Harvey (1968), On the effect of a sharp bend in a fully developed turbulent pipe-flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 34(3) 595-608.
- [6] Y. Agrawal, L. Talbot & K. Gong (1978), Laser anemometer study of flow development in curved pipes. *Journal of Fluid Mechanics*, 85(3) 497-518.
- [7] W. Dean (1928), LXXII. The stream-line motion of fluid in a curved pipe (second paper), 5(30) 673-695.
- [8] W. Dean (1927), XVI. Note on the motion of fluid in a curved pipe, 4(20) 208-223.
- [9] K. Sudo, M. Sumida & H. Hibara (1998), Experimental investigation on turbulent flow in a circular-sectioned 90-degree bend, 25(1) 42-49.
- [10] P. Dutta, S.K. Saha, N. Nandi, N. Pal (2016), Numerical study on flow separation in 90° pipe bend under high Reynolds number by k- $\epsilon$  modelling. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19(2) 904-910.
- [11] D. Schanz, S. Gesemann & A.Schröder (2016), Shake-The-Box : Lagrangian particle tracking at high particle image densities. *Experiments in Fluids* 57-70.
- [12] M. Novara, D. Schanz & A.Schröder (2018), Shake-The-Box for multi-pulse systems : 3D Lagrangian particle tracking in high speed flows.
- [13] C. Brücker (1998), A time-recording DPIV-study of the swirl-switching effect in a 90° bend flow.