



HAL
open science

Mesures STB multi-pulse d'un écoulement en charge en aval d'une singularité: étude statistique et décomposition POD

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.. Mesures STB multi-pulse d'un écoulement en charge en aval d'une singularité: étude statistique et décomposition POD. Congrès Francophone de Techniques Laser, CFTL 2022, Sep 2022, Leuven, Belgique. hal-03838039

HAL Id: hal-03838039

<https://hal.science/hal-03838039v1>

Submitted on 3 Nov 2022

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.

MESURES STB MULTI-PULSE D'UN ECOULEMENT EN CHARGE EN AVAL D'UNE SINGULARITE : ETUDE STATISTIQUE ET DECOMPOSITION POD

Bilal Ben Haroual ^{a-b,*}, Didier Boldo ^a, Emmanuel Thibert ^a, Eric Nanteau ^a

Julie Albagnac ^b, Romain Mathis ^b

(a) EDF R&D, 78400 Chatou - France

(b) Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT), Université de Toulouse, CNRS, 31000 Toulouse - France

*Correspondant: bilal.benharoual@toulouse-inp.fr

Résumé : Cette étude s'inscrit dans un projet de recherche qui a pour objectif d'appréhender les écoulements turbulents en aval de singularités (en particulier, un simple coude, et un double coude coplanaire en S), afin d'améliorer l'exactitude métrologique des débitmètres industriels installés dans ces sections de mesure. Le présent article présente les premiers résultats des essais expérimentaux effectués sur la boucle « Mont Blanc » sur le site de Chatou. Ces essais ont été réalisés en utilisant le module Shake The Box (STB) multi-pulse développé par LaVision, et ont conduit à la reconstruction trois dimensions-trois composantes (3D3C) de la vitesse pour différents débits de commande à différentes distances en aval de la singularité étudiée.

1 Introduction

Dans une centrale nucléaire de production électrique, la maîtrise des débits locaux contribue au bon fonctionnement de la centrale. Par exemple, dans un circuit de refroidissement, un débit trop faible engendrerait des températures de sortie trop importantes et à l'inverse un sur-débit pourrait dégrader certains composants du circuit. Surveiller les mesures de débits et leurs incertitudes est une tâche primordiale pour garantir la sûreté et la performance de plusieurs installations dans de nombreux domaines industriels.

Pour réaliser des mesures de débit en milieu industriel, il existe de nombreuses technologies : débitmètre électromagnétique, à ultrason, à pression différentielle, etc. Bien que potentiellement très différents dans leurs principes de fonctionnement, ces appareils présentent tous une sensibilité plus ou moins importante au profil de vitesse à l'endroit de leur mise en œuvre. En effet, les constructeurs de débitmètre définissent des conditions idéales de fonctionnement de leurs appareils et les incertitudes de mesure annoncées sont propres à ces configurations : c'est pourquoi les débitmètres fonctionnent de façon optimale quand ils sont implantés dans des zones où le champ de vitesse est connu a priori, c'est-à-dire des zones situées en aval d'importantes longueurs droites de tuyauterie où l'écoulement est turbulent, établi et axisymétrique. Cette condition n'est pas toujours satisfaite sur les applications industrielles, du fait de l'existence de plusieurs singularités le long des circuits (simple coude, double coude, té, évasement de section, vanne, etc.) L'écoulement devient alors intrinsèquement tridimensionnel au passage de la singularité avec la génération de structures de vorticités cohérentes et robustes.

Mesurer un débit dans des configurations qui diffèrent de celles définies par le constructeur, produit des incertitudes supplémentaires. Ces dernières sont déterminées sur des bancs d'essais, et l'information, qui est non exhaustive, vient essentiellement des fournisseurs. Les utilisateurs, en général, ne peuvent pas évaluer l'exactitude de ces indications et sont parfois confrontés à des configurations non étudiées. Quand ces incertitudes sont inconnues ou deviennent très importantes, les mesures de débits deviennent inacceptables car elles ne satisfont plus les attentes des installations industrielles : l'exploitant a souvent recouru à des étalonnages de ces appareils dans des configurations réelles pour corriger les mesures effectuées en évaluant les erreurs dues aux singularités situées en amont.

Dans ce contexte, appréhender les effets d'une singularité sur la dynamique de l'écoulement permettrait d'augmenter la précision des mesures de débit. Pour ce faire, la boucle d'essais « Mont Blanc » installée sur le site de EDF R&D de Chatou a été équipée d'un système de métrologie laser afin d'y mener des expériences de vélocimétrie, et en l'occurrence des mesures quantitatives 3D grâce au module Shake The Box multi-pulse.

Dans la suite, l'état des connaissances sur les effets d'un simple coude sur un écoulement en charge sont présentés. La métrologie et le dispositif expérimental que nous avons utilisés sont détaillés. Enfin, l'écoulement tridimensionnel en aval d'un simple coude et en aval d'un double coude coplanaire en S sont présentés à 3,5 fois le diamètre hydraulique en aval de chaque singularité.

2 Effets d'un simple coude à 90° sur un écoulement en charge

L'étude des effets d'une courbure sur un écoulement en charge a commencé au début du 20^{ème} siècle avec Eustice [1], qui a mené des expériences de visualisation d'écoulement par injection de colorant dans des tuyauteries transparentes présentant différents rayons de courbures. Il a mis en lumière des lignes de courants dont les géométries étaient très différentes de celles observées pour un écoulement en longueur droite.

C'est Dean [2][3] qui fut le premier à démontrer analytiquement la génération d'un écoulement secondaire au passage d'un fluide par une conduite courbée : un écoulement transverse émerge sous forme d'une paire de tourbillons contrarotatifs dont les axes suivent la courbure de la conduite, comme illustré plus loin. Plusieurs études théoriques, expérimentales et numériques ont suivi depuis les travaux de Dean dans le but de mieux comprendre la dynamique des écoulements en charge dans des conduites présentant des singularités. Les premières études expérimentales ont été conduites à l'aide d'éléments intrusifs tels que des fils chauds [4]. Il s'en suivit des études avec des méthodes optiques plus récentes et non intrusives telles les techniques laser (e.g. Anémométrie Laser Doppler (LDA) [5]).

Les études qui se sont intéressées à l'effet d'un simple coude à 90°, s'accordent globalement sur la façon dont l'écoulement secondaire est généré depuis l'entrée jusqu'à la sortie de la singularité. Toutefois, les chercheurs ne sont pas parvenus à un consensus concernant l'étendue spatiale des effets du coude en aval de celui-ci. A titre d'exemple, la norme européenne NF EN ISO 5167-2 stipule qu'il faut se placer à $44D_n$ (D_n étant le diamètre hydraulique) en aval d'un simple coude pour avoir un effet nul sur l'incertitude de mesure de débit.

Sudo et al. [6] donnent une analyse détaillée des effets du simple coude à 90° sur l'écoulement :

- A l'entrée du coude, la diminution de la pression au niveau de la paroi interne (l'intrados) cause une accélération du fluide, tandis que l'augmentation de la pression au niveau de la paroi externe (l'extrados) le ralentit.
- A 30° de l'entrée de la singularité, la force centrifuge engendre dans la section transversale deux tourbillons contrarotatifs : les tourbillons de Dean. L'écoulement reste rapide au niveau de la paroi interne.
- A 60° de l'entrée du coude, la force centrifuge devient plus importante et transporte les particules fluides accélérées vers l'extrados tandis qu'elle éjecte les particules lentes vers

l'intrados. De surcroît, la pression diminue au niveau de la paroi externe et augmente au niveau de la paroi interne. Le fluide accélère à l'extrados.

- De 60° jusqu'à la sortie du coude, le phénomène décrit au dernier point s'amplifie.

La Figure 1 illustre l'évolution décrite ci-dessus.

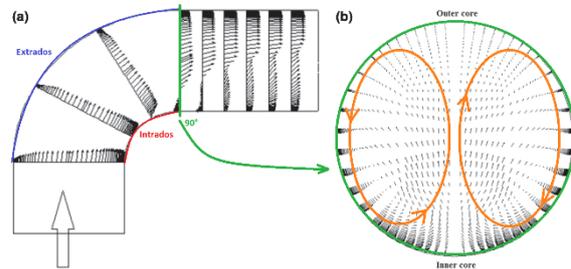


Figure 1 : Écoulement à travers un coude 90° : vecteurs vitesses normalisés. (a) plan de symétrie, (b) section à la sortie du coude (90°). Extrait de Dutta et al. [7]

L'état de l'art pour un écoulement en aval d'un double coude n'est pas aussi étoffé que pour le simple coude. On peut citer Ching et al. [8] qui caractérisent l'écoulement à travers une combinaison en S de deux coudes à 90° collés l'un à l'autre. Ils notent une survitesse au niveau de l'intrados du deuxième coude. Dans le présent travail, on s'intéresse à un double coude coplanaire en S avec un tronçon droit d'une longueur de $5D_n$ séparant les deux coudes.

3 Veine de mesure Mont Blanc et dispositif expérimental

3.1 Banc d'essai Mont Blanc

Les essais expérimentaux ont été réalisés sur la boucle d'essai Mont Blanc illustrée sur la Figure 2 en fin de document. Il s'agit d'un circuit fermé en eau liquide avec débit et température régulés. Ce banc d'essais, constitué de tuyauteries en acier inoxydable de diamètre intérieur $D_n = 100\text{mm}$, a pour objectif de modéliser des configurations industrielles réelles et d'y mener des essais d'évaluation métrologique et d'étalonnage. L'aspect modulaire de la veine, facilite les changements de configurations et la mise au point de différentes métrologies, dont les techniques laser. La boucle, accréditée Cofrac¹, permet de balayer une large gamme de débits allant jusqu'à $Q = 150\text{m}^3/\text{h}$.

Afin de déployer une métrologie optique sur une veine d'essai à section circulaire, il est d'usage d'utiliser un cylindre immergé dans une boîte de visualisation munie parfois de prismes afin de diminuer au maximum les déformations optiques.

¹ Comité français d'accréditation

Dans ce travail, il a été question de trouver une solution plus compacte, et nous avons conçu des manchettes en plexiglas ayant des formes non usuelles. Le premier prototype : manchette Hippo illustrée sur la Figure 3, a été testé et jugé non adapté à cause de plusieurs défauts constatés, le plus limitant étant l'apparition de reflets parasites de l'illumination laser : l'emplacement des arrêtes du prisme n'était pas optimal. Les améliorations proposées ont conduit à la conception de la manchette Hippo 2.0 présentée sur la Figure 4, qui a servi pour les mesures présentées ci-après.



Figure 2 : Manchette Hippo

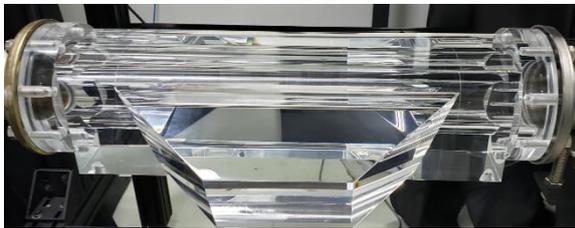


Figure 4 : Manchette Hippo 2.0

3.2 Métrologie pour la mesure Shake The Box multi-pulse

Le matériel utilisé pour les essais de vélocimétrie laser consiste en un laser Nd : YAG à double cavité, d'une fréquence maximale de 15Hz par cavité, de quatre caméras Imager SX CCD d'une résolution de 6Mpixels avec une technique de double image PIV, une durée de transfert d'image de 150ns et une fréquence de 25Hz. Les quatre caméras sont disposées dans le plan de symétrie horizontal de la conduite de façon à ce que chaque axe optique soit orthogonal à l'une des quatre facettes de la manchette Hippo 2.0 (voir Figure 4). Les facettes amonts et avalés de la manchette (par lesquelles les caméras visualisent l'écoulement) forment respectivement des angles de 45° et -45° avec le plan transversal de la conduite. Tandis que les facettes supérieures et inférieures forment respectivement des angles de $22,5^\circ$ et $-22,5^\circ$ avec le plan diamétral de la conduite.

Afin de mener des mesures directes des champs de vitesse 3D3C, le module Shake The Box (STB) multi-pulse [9][10] développé par LaVision a été utilisé. Les trajectoires des particules reconstruites par ce module (mesure lagrangienne), ont été ensuite projetées sur

une grille eulérienne pour déterminer les champs de vitesse 3D3C.

4 Résultats et discussion

Tout d'abord, des essais en longueur droite ont été menés afin de valider l'aspect pleinement développé et axisymétrique de l'écoulement, ce qui a fourni des profils de références ainsi que la longueur droite à garder en amont de la singularité à étudier : une distance de $40D_n$ imposée pour s'assurer que l'écoulement en sortie de la singularité n'est tributaire que de celle-ci.

Ensuite des essais en aval d'un simple coude à 90° ont été effectués, suivis par des essais 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 rayon de courbure $R_c = 1,5D_n$.

Les essais ont été effectués pour six nombres de Reynolds allant de $Re = 9005$ à $Re = 540350$ et à deux stations de mesures $3,5D_n$ et $10D_n$ en aval du coude et du double coude. Ce document présente uniquement les résultats pour les deux singularités à $3,5D_n$ pour un nombre de Reynolds fixé $Re = 252160$ qui correspond à un débit de commande $Q_{ref} = 70m^3/h$. Ces résultats sont issus d'une reconstruction d'un champ de particules sur une section de diamètre $D = 106mm$, car sur un anneau extérieur de $2mm$ proche paroi les déformations optiques n'ont pas pu être corrigées. Sur les figures des champs reconstruits, le repère est orthogonal avec Oz l'axe de l'écoulement. Certaines quantités sont adimensionnées par la vitesse débitante $U_b = Q_{ref}/S$, où S représente la surface de la section de la conduite.

4.1 Etude de convergence

Sur les trois configurations considérées (longueur droite, simple coude et double coude), une étude de convergence a été menée pour les deux configurations les plus défavorables, à savoir celles avec singularités. La Figure 5 représente la différence entre le champ de vitesse axiale \overline{U}_z obtenu par la moyenne de 1000 réalisations indépendantes et ceux obtenus par la moyenne de $k = \{100, 200, 500, 700\}$ échantillons.

On constate qu'à partir de 700 réalisations, les champs de vitesse moyenne n'évoluent plus. Le nombre de réalisations retenu, i.e. 1000, apparaît donc bien adapté aux présentes mesures. Un résultat similaire est observé sur les champs des vitesses azimutale \overline{U}_θ et radiale \overline{U}_r .

La Figure 6 représente la convergence des profils de la vitesse axiale \overline{U}_z tracée le long de l'axe de la symétrie de l'écoulement.

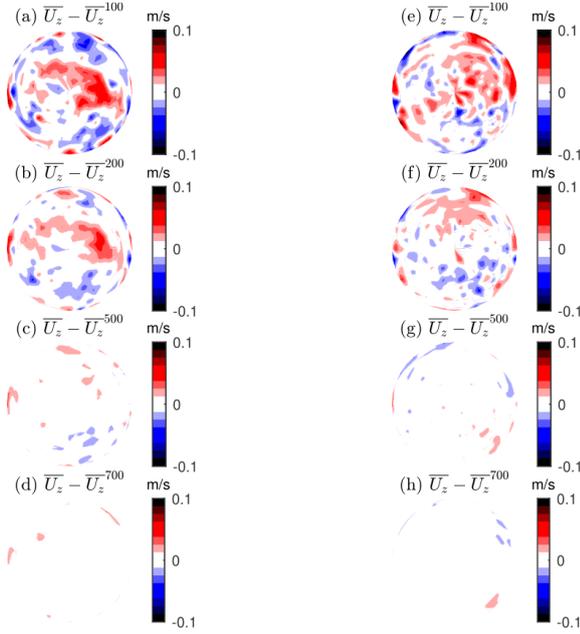


Figure 5 : Convergence du champ axial \overline{U}_z . (a-d) : simple coude, (e-h) : double coude.

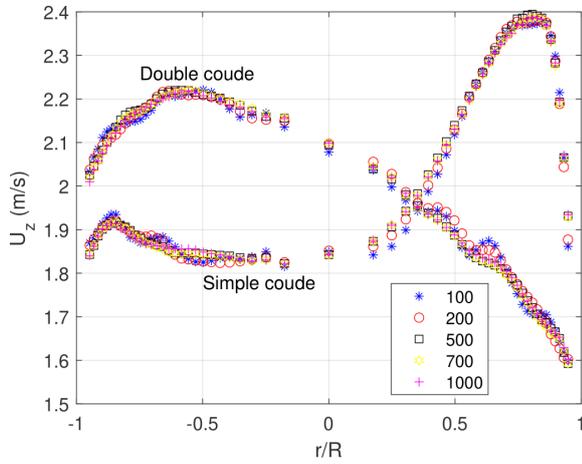


Figure 6 : Convergence du profil de la vitesse axiale \overline{U}_z pour le simple et double coude

4.2 Mesures à $3,5D_n$ en aval d'un simple et double coude

4.2.1 Champs moyens

Les essais ont été réalisés en prenant 1000 échantillons (1000 doublés d'images) indépendants. Les champs illustrés ci-dessous représentent des moyennes pondérées sur l'ensemble des 1000 réalisations. Il s'agit des vitesses axiale \overline{U}_z , radiale \overline{U}_r et azimutale \overline{U}_θ , ainsi que la vorticité $\omega = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial r \overline{U}_\theta}{\partial r} - \frac{\partial \overline{U}_r}{\partial \theta} \right)$.

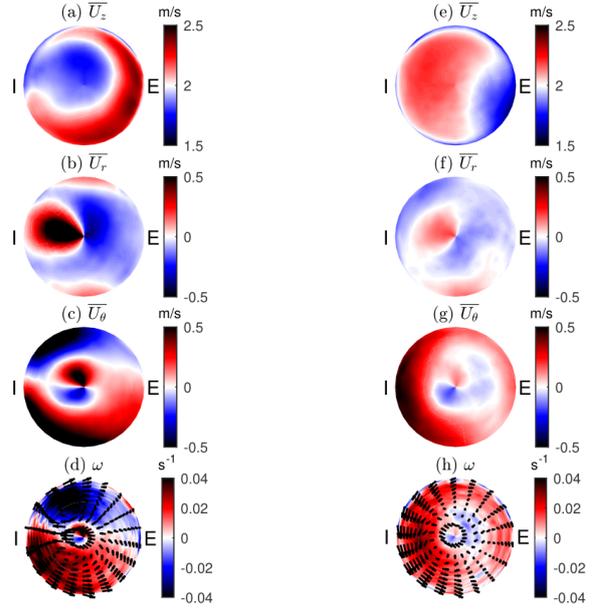


Figure 7 : Champs moyens obtenus à $3,5D_n$ en aval de la singularité. (a-d) : simple coude, (e-h) : double coude. I : Intrados, E : Extrados.

Les isocontours représentés sur les Figures 7(a) et 7(e) montrent les déformations subies par le champ de vitesse axiale après le passage du fluide dans le simple et le double coude respectivement. Le champ \overline{U}_z en aval du simple coude concorde avec l'analyse effectuée plus haut, où l'on note une survitesse au niveau de la paroi externe en sortie du coude (à droite de la figure), cette survitesse est également visible sur les profils de la Figure 6. Tandis que le champ \overline{U}_z en aval du double coude présente une survitesse au niveau de la paroi interne en sortie du deuxième coude (à gauche de la figure), ce qui est aussi visible sur les profils de la Figure 6.

Les Figures 7(b)(c) et 7(f)(g) mettent en évidence l'écoulement secondaire engendré respectivement par le passage de l'écoulement dans un simple coude et dans un double coude. Les champs $\{\overline{U}_r, \overline{U}_\theta\}$ illustrés avec la mesure de la vorticité sur les Figures 7(d) et 7(h) mettent en évidence la présence de structures tourbillonnaires générées par les singularités. Dans le cas d'un simple coude (Figure 7(d)) on note la présence des tourbillons de Dean, alors que dans le cas du double coude (Figure 7(h)) on observe une seule grande structure monoplanaire occupant toute la section. Les modulations moyennes de la vitesse (\overline{U}_r et \overline{U}_θ) sont plus intenses en sortie du simple coude qu'en sortie du double coude. Dans une configuration en double coude coplanaire en S, la singularité avale semble avoir pour effet de redresser l'écoulement.

4.2.2 Dynamique de l'écoulement

La mesure lagrangienne est tributaire de la densité locale de particules. De ce fait, le passage du suivi lagrangien au champ de vitesse eulérien à partir d'un seul doublé d'images engendre des champs

incomplets et parfois des valeurs de vitesses très éloignées des valeurs moyennes attendues.

DaVis permet d'obtenir des « pseudo champs instantanés » en effectuant une moyenne glissante pondérée sur 3, 5, 7 échantillons indépendants, voire plus. Les champs obtenus sont plus complets et les valeurs sont plus proches d'un champ à l'autre. Cela dit, la moyenne glissante peut supprimer artificiellement des fluctuations propres à l'écoulement, d'où l'importance du choix du nombre d'échantillons considérés pour effectuer la moyenne. Une étude de l'influence de ce paramètre a été menée en comparant les résultats obtenus avec 3, 5 et 7 réalisations. La moyenne glissante avec 3 doublés d'images ne permet pas l'obtention d'un champ complet, tandis que la moyenne avec 7 réalisations lisse énormément le signal et les champs obtenus deviennent quasiment identiques. Cela nous a conduit à garder des champs issus d'une moyenne glissante pondérée sur 5 échantillons, assurant la reconstruction d'un champ complet, tout en gardant une représentativité de la réalisation instantanée. Ceci s'apparente à filtrer les données avec un filtre passe bas qui n'affecte que les petites structures de l'écoulement.

Un des intérêts de considérer les champs instantanés est de pouvoir extraire les champs fluctuants et décomposer l'écoulement en modes propres (POD) afin d'obtenir les structures énergétiques dominantes de l'écoulement et mieux comprendre l'effet de la singularité.

La POD est une technique qui s'appuie sur un traitement statistique des mesures d'un signal, en l'occurrence ici les fluctuations des vitesses transverses u_r et u_θ . On extrait les différents modes les plus énergétiques, ce qui permet de reconstruire le signal avec N modes sous la forme suivante :

$$u_r(\underline{x}, t) = \sum_{i=1}^N a_i(t) \phi_r^i(\underline{x})$$

$$u_\theta(\underline{x}, t) = \sum_{i=1}^N a_i(t) \phi_\theta^i(\underline{x})$$

Avec t le temps, \underline{x} le vecteur position, $\{a_i\}$ la famille orthonormée des coefficients de projection, $\{\phi_r^i\}$ la base orthogonale de projection pour la vitesse u_r et $\{\phi_\theta^i\}$ la base orthogonale de projection pour la vitesse u_θ .

Pour des mesures décorrélatées et résolues en espace, c'est la décomposition dite Snapshot POD qui est appliquée. Cette dernière consiste à obtenir les coefficients $\{a_i\}$ en premier en diagonalisant le tenseur de corrélations temporelles

$$K(t, t') = \frac{1}{M} \left(\int u_r(\underline{x}, t) u_r(\underline{x}, t') dx + \int u_\theta(\underline{x}, t) u_\theta(\underline{x}, t') dx \right)$$

Où M représente la taille de la fenêtre spatiale. Il en découle les modes spatiaux $\{\phi_r^i\}$ (respectivement $\{\phi_\theta^i\}$) en projetant les $\{a_i\}$ sur le champ u_r

(respectivement u_θ). La k^{eme} valeur propre λ_k issue de la diagonalisation représente l'énergie de k^{eme} mode $\{a_k, \phi_{r,\theta}^k\}$.

La Figure 8 présente les contributions des 100 premiers modes ainsi que leurs cumuls (au sens de l'énergie) pour le simple et double coude.

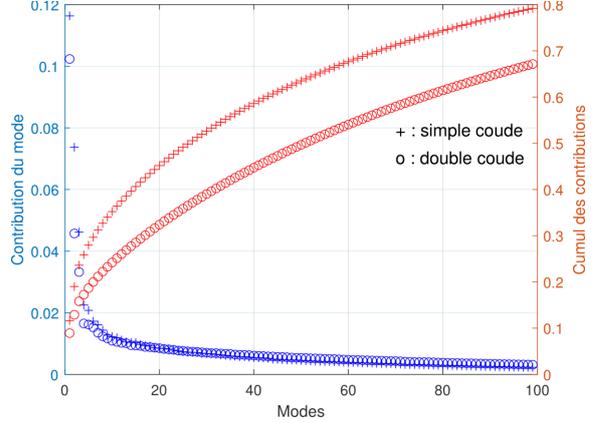


Figure 8 : POD : Contribution des 100 premiers modes et l'énergie cumulée.

La Figure 8 montre que les premiers modes pour le simple coude sont plus énergétiques que les premiers modes du double coude, ce qui se reflète sur le cumul des contributions des modes où l'on note que les 100 premiers modes du simple coude contribuent à 79,5% de l'énergie totale, alors que les 100 premiers modes du double coude emmagasinent 67,4% de l'énergie. On peut donc en déduire que les perturbations engendrées par le simple coude sont plus intenses, et requièrent potentiellement plus de longueurs droites pour se dissiper. La Figure 9 (respectivement la Figure 10) illustre les 3 premiers modes spatiaux dans les directions radiale ($\phi_r^1, \phi_r^2, \phi_r^3$) et azimutale ($\phi_\theta^1, \phi_\theta^2, \phi_\theta^3$) pour un simple coude (respectivement un double coude). Sur ces mêmes figures sont illustrées les structures tourbillonnaires résultantes au niveau de la section.

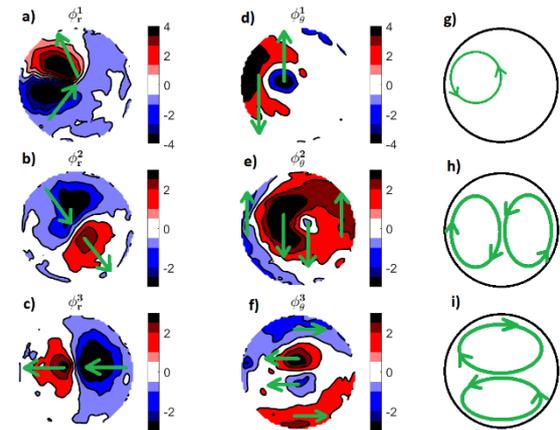


Figure 9 : Les 3 premiers modes spatiaux pour un simple coude. (a-c) : direction radiale, (d-f) : direction azimutale, (g-i) : structures résultantes.

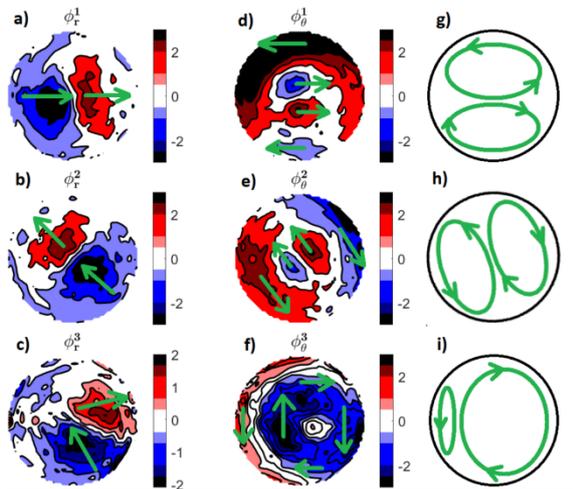


Figure 10 : Les 3 premiers modes spatiaux pour un double coude coplanaire en S. (a-c) : direction radiale, (d-f) : direction azimutale, (g-i) : structures résultantes.

5 Conclusion

Ce document présente des mesures de champ de vitesse 3D3C obtenus par la méthode Shake The Box multi-pulse pour un écoulement d'eau en aval d'un simple et d'un double coude.

Une première étude STB en longueur droite a permis de fixer la distance à imposer en amont des singularités étudiées et une étude de convergence a été menée pour les configurations les plus défavorables afin de s'assurer de la convergence des données. Les champs moyens reconstruits ont permis de caractériser la déformation de la vitesse axiale et ont mis en évidence l'écoulement secondaire généré au passage de la singularité : les structures cohérentes qui le régissent ont été mesurées, notamment les tourbillons de Dean déjà connus en aval d'un simple coude.

Une décomposition en modes propres a permis de caractériser les structures les plus énergétiques qui contribuent à déformer le champ initialement pleinement développé à l'entrée de la singularité.

6 References

[1] Eustice J., Experiments on stream-line motion in curved pipes, 85(576)119-131 (1911).

[2] Dean W., LXXII. The stream-line motion of fluid in a curved pipe (second paper), 5(30) 673-695 (1928).

[3] Dean W., XVI. Note on the motion of fluid in a curved pipe, 4(20) 208-223 (1927).

[4] Tunstall M.J, Harvey J.K, On the effect of a sharp bend in a fully developed turbulent pipe-flow. Journal of Fluid Mechanics, 34(3) 595-608 (1968).

[5] Agrawal Y., Talbot L., Gong K., Laser anemometer study of flow development in curved pipes. Journal of Fluid Mechanics, 85(3) 497-518 (1978).

[6] Sudo K., Sumida M., Hibara H., Experimental investigation on turbulent flow in a circular-sectioned 90-degree bend, 25(1) 42-49 (1998).

[7] Dutta P., Saha S.K., Nandi N., Pal N., Numerical study on flow separation in 90° pipe bend under high Reynolds number by k-ε modelling. Engineering Science and Technology, an International Journal, 19(2) 904-910 (2016).

[8] Mazhar H., Ewing D., Cotton J.S., Ching C.Y., Measurement of the flow field characteristics in single and dual S-shape 90° bends using matched refractive index PIV. Experimental Thermal and Fluid Science 79 65-73 (2016).

[9] Schanz D., Gesemann S., Schroder A., Shake-The-Box: Lagrangian particle tracking at high particle image densities. Experiments in Fluids 57-70 (2016).

[10] Novara M., Schanz D., Schroder A., Shake-The-Bow for multi pulse systems: 3D Lagrangian particle tracking in high speed flows (2018).



Partie principale : débitmètres de référence et tuyauterie



Partie souterraine : cuve d'eau, pompe et échangeur

Figure 2 : Boucle Mont Blanc. EDF R&D, Chatou - Ile de France