



**HAL**  
open science

## Correction des erreurs statistiques aléatoire et systématique par une nouvelle méthode de traitement LDV. Application aux écoulements de sillage du corps d'Ahmed

Romain Rodriguez, Donnadiou Balou, Emilien Varea, Frédéric Murzyn,  
Amine Mehel, Béatrice Patte-Rouland, Frédérique Larrarte

### ► To cite this version:

Romain Rodriguez, Donnadiou Balou, Emilien Varea, Frédéric Murzyn, Amine Mehel, et al.. Correction des erreurs statistiques aléatoire et systématique par une nouvelle méthode de traitement LDV. Application aux écoulements de sillage du corps d'Ahmed. 16ème Congrès Francophone de Techniques Laser pour la mécanique des fluides, CNRS, CentraleSupélec, Université Paris Saclay, IRSN, Sep 2018, Dourdan, France. hal-02097682

**HAL Id: hal-02097682**

**<https://hal.science/hal-02097682>**

Submitted on 12 Apr 2019

**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.

# Correction des erreurs statistiques aléatoires et systématiques par une nouvelle méthode de traitement LDV. Application aux écoulements de sillage du corps d'Ahmed

Romain RODRIGUEZ<sup>1</sup>, Donnadieu BALOU<sup>2</sup>, Émilien VAREA<sup>2</sup>, Frédéric MURZYN<sup>1</sup>,  
Amine MEHEL<sup>4</sup>, Béatrice PATTE-ROULAND<sup>2</sup>, Frédérique LARRARTE<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ESTACA'LAB, Département Mécanique, Rue Georges Charpak, 53 000 Laval, France

<sup>2</sup>CORIA, UMR 6614, 675 avenue de l'université, 76 801 Saint Étienne du Rouvray, France

<sup>3</sup>ESTACA'LAB, Département Mécanique, 12 avenue Paul Delouvrier, 78 066 Saint Quentin en Yvelines, France

<sup>4</sup>IFSTTAR, Département GERS, route de Bouaye CS4 44344 Bouguenais Cedex, France

Email auteur correspondant : romain.rodriquez@estaca.fr

Le mode d'acquisition « Individual Realization » en LDV peut mener à deux types d'erreur statistique lors du calcul des propriétés statistiques d'un écoulement : une erreur systématique proportionnelle au carré de l'intensité de turbulence en condition d'ensemencement homogène, et une erreur aléatoire liée aux bouffées en ensemencement non homogène. Dans ces travaux, nous évaluons les corrections apportées par une nouvelle méthode de traitement de données ITTT traitant de ces deux erreurs au regard des méthodes existantes couramment utilisées. L'étude s'applique aux écoulements de sillage du corps d'Ahmed avec différents angles de lunette arrière. La correction atteint la valeur maximale de 13% dans le sillage du corps à 25°. Dans un second temps, des comparaisons sont effectuées sur des mesures LDV (ESTACA) et PIV (CORIA) réalisées dans des conditions expérimentales similaires. La proximité des résultats entre les deux campagnes permet de valider d'une manière générale le protocole expérimental utilisé pour la campagne de mesures LDV.

## 1 Introduction

Obtenir une bonne qualité d'ensemencement est connu pour être un paramètre clé pour les mesures optiques (LDV, PIV). Concernant la technique LDV, le mode d'acquisition « Individual Realization » (IR) permet d'enregistrer les informations sur la vitesse de l'écoulement à chaque fois qu'une particule d'ensemencement passe dans le volume de mesure et qu'elle est validée par le processeur (qualité de signal suffisante). Toutefois, les intervalles de temps  $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$  entre deux mesures consécutives sont irréguliers et peuvent mener à deux types d'erreur statistiques :

- ① L'erreur systématique (ou biais) liée à la vitesse des particules [1] : dans des conditions de concentration spatiale d'ensemencement homogène (EH), les particules à vitesse plus élevée (resp. plus basse) que la vitesse moyenne sont enregistrées en plus grand nombre (resp. plus petit nombre). L'erreur systématique lors d'une moyenne d'ensemble prise comme moyenne temporelle est alors proportionnelle au carré de l'intensité de turbulence [1].
- ② L'erreur aléatoire liée aux bouffées [2] : alors que des conditions (EH) sont facilement atteignables en soufflerie circuit fermé, c'est moins le cas en circuit ouvert où l'on est obligé de ré-ensemencer régulièrement. Maintenir une fréquence d'acquisition élevée et constante dans certaines régions d'écoulement (centres tourbillonnaires, proximité des parois, points de stagnation) peut s'avérer très difficile. Ainsi, des bouffées de particules apparaissant en conditions d'ensemencement non-homogène (ENH) peuvent potentiellement augmenter l'erreur aléatoire, caractérisée par une plus grande dispersion des statistiques.

Dans l'estimation (notée  $\hat{\cdot}$ ) des statistiques issues des mesures LDV (moyennes notées  $\bar{\cdot}$ , fluctuations notées  $\cdot'$ ), des méthodes de pondération sont couramment utilisées (équations 1, 2, 3). A notre connaissance, l'erreur aléatoire n'a été caractérisée que récemment [2]. Ainsi, les méthodes de pondération principalement utilisées dans la littérature ont pour objectif de réduire l'erreur systématique. Leur

utilisation au regard de l'erreur aléatoire liée aux bouffées a également été étudiée [2], les conclusions étant les suivantes :

- Méthode d'Ensemble E : le facteur de pondération  $\gamma_{i,E} = 1$  est unitaire et les deux types d'erreurs sont présents dans les résultats [1], [2].
- Méthode des Temps de Transit TT : la pondération par le temps de transit des particules dans le volume de mesure  $\gamma_{i,TT} = \tau_i$  est utilisée pour corriger l'erreur systématique en conditions EH [3] mais ne corrige pas l'erreur aléatoire liée aux bouffées en conditions ENH [2].
- Méthode des Intervalles de Temps IT : la pondération  $\gamma_{i,IT} = \Delta t_i$  ne corrige pas l'erreur systématique pour des faibles fréquences d'acquisition (entre 10Hz et 150Hz dans l'étude [2]) mais corrige l'erreur aléatoire liée aux bouffées [2].

Le booléen  $\xi$  (Eq.4) est recommandé lors de l'utilisation du mode d'acquisition IR [4]. En effet, le mode IR requiert d'une part de supprimer les cas où plusieurs particules sont présentes dans le volume de mesure, et d'autre part d'éviter que plusieurs couples de données d'une seule et même particule soient délivrés. Ainsi, le booléen  $\xi$  permet de retirer les mesures pour lesquelles le temps de transit de la particule dans le volume de mesure  $\tau_i$  est supérieur à l'intervalle de temps écoulé jusqu'à la mesure suivante  $\Delta t_{i+1} = t_{i+1} - t_i$ .

$$\widehat{u} = \frac{\sum_{i=1}^N u_i \xi_i \gamma_i}{\sum_{i=1}^N \xi_i \gamma_i} \quad (1)$$

$$\widehat{u}' = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \xi_i \gamma_i (u_i - \widehat{u})^2}{\sum_{i=1}^N \xi_i \gamma_i}} \quad (2)$$

$$\widehat{u'v'} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \xi_i \gamma_i (u_i - \widehat{u})(v_i - \widehat{v})}{\sum_{i=1}^N \xi_i \gamma_i}} \quad (3)$$

$$\xi_i = \begin{cases} 0 & \text{si } \tau_i > \Delta t_{i+1} \\ 1 & \text{si } \tau_i < \Delta t_{i+1} \end{cases} \quad (4)$$

En considérant ces manques présents dans la littérature, une nouvelle méthode de traitement ITTT (Intervalle de Temps et Temps de Transit) a été construite et validée pas à pas pour le calcul précis des statistiques indépendamment des conditions d'ensemencement : il a été montré que le facteur de pondération  $\gamma_{i,ITTT} = \gamma_{i,IT} \times \gamma_{i,TT} = \Delta t_i \tau_i$  intègre les avantages de IT et TT dans la gamme de fréquence d'acquisition de l'étude [2].

L'objectif de l'article est d'évaluer l'apport de la correction par cette nouvelle méthode ITTT au regard des différents erreurs statistiques évoquées. L'étude sera appliquée à l'ensemble d'une campagne de mesures LDV dédiée à la caractérisation des écoulements de sillage du corps d'Ahmed avec 3 angles de lunette arrière. Dans un second temps, certaines propriétés de l'écoulement seront comparées à des mesures PIV réalisées au laboratoire du CORIA à Rouen et dans des conditions expérimentales similaires.

## 2 Moyens expérimentaux

### 2.1 Mesures LDV (ESTACA) pour l'évaluation des corrections

Les mesures LDV ont été réalisées à l'ESTACA Campus Ouest à Laval. La soufflerie utilisée est le modèle EA103 de DeltaLab. Il s'agit d'une soufflerie à circuit ouvert, subsonique et à aspiration, pouvant générer des vitesses allant jusqu'à  $40m.s^{-1}$ . La veine d'essais est de section carrée de dimensions  $0,3m \times 0,3m$  et de longueur  $1m$ . L'intensité de turbulence moyenne au sein de la veine d'essais est de 1,2%.

Les maquettes utilisées sont trois géométries du corps d'Ahmed [5] avec des angles de lunette arrière respectifs de  $\varphi = 0^\circ$ ,  $\varphi = 25^\circ$  et  $\varphi = 35^\circ$  (Fig.1). Ces géométries permettent de reproduire les structures tourbillonnaires principales des écoulements de sillage en automobile, tout en s'affranchissant de nombreux décollements à l'avant. Par rapport aux travaux originaux [5], notre facteur d'échelle géométrique est de 0,19. Le taux de blocage correspondant est donc de 4,8%. Étant inférieur à 6%, nous nous affranchissons des corrections des effets de blocage [6]. On note  $(O_c x_c y_c z_c)$  le repère associé aux maquettes et placé dans le plan de symétrie (Fig.1), ainsi que  $h_c = 0,054m$  leur hauteur. Dans la suite

des travaux, la hauteur  $h_c$  est utilisée pour les coordonnées réduites. Les maquettes sont fixées à travers le plancher de la soufflerie grâce à une tige filetée de diamètre  $5\text{mm}$ . La hauteur des pieds cylindriques est de  $15\text{mm}$ , définissant ainsi la garde au sol réduite  $h_g/h_c = 0,28$ . La vitesse d'étude  $U_\infty$  est fixée à  $14,3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , correspondant à un nombre de Reynolds  $\mathcal{R}_e = U_\infty h_c/\nu = 4,95\cdot 10^4$ .

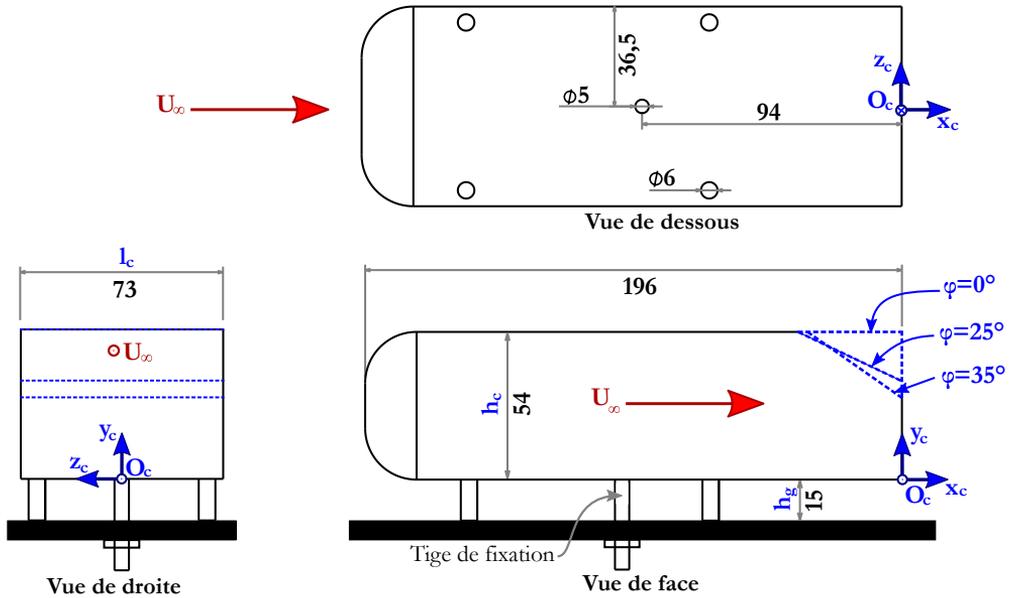


FIGURE 1 – Maquettes du corps d’Ahmed [5] utilisées et notations associées (dimensions en millimètres). Les trois angles de lunette  $\varphi = 0^\circ$ ,  $\varphi = 25^\circ$  et  $\varphi = 35^\circ$  sont utilisés

Le système LDV est le modèle DANTEC<sup>MD</sup> Dynamics 2D Flow Explorer permettant de mesurer de deux composantes  $u$  et  $v$  du vecteur vitesse respectivement dans les directions longitudinales  $x_c$  et verticales  $y_c$ . Les longueurs d’onde de chaque faisceau sont de  $660\text{nm}$  et  $785\text{nm}$  et l’interfrange de  $5,45\mu\text{m}$  pour  $u$  et  $6,40\mu\text{m}$  pour  $v$ . Les tailles des volumes de mesure sont de  $0,17 \times 0,17 \times 2,8\text{mm}^3$  et  $0,20 \times 0,20 \times 3,4\text{mm}^3$ . La longueur de la focale utilisée est de  $500\text{mm}$  et le décalage en fréquence des faisceaux de  $80\text{MHz}$ . DANTEC<sup>MD</sup> assure une grande précision de mesure du système dont l’incertitude sur chaque composante est de  $0,07\%$ . Le système de traverse est 2D de direction  $x_c$  et  $y_c$ . Le système d’ensemencement utilisé est le générateur de fumées SAFEX<sup>MD</sup> S 195 G avec le liquide SAFEX<sup>MD</sup> Inside Nebelfluid Extra Clean fourni par DANTEC<sup>MD</sup>, à savoir une mixture de diéthylène glycol  $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}_3$  et d’eau. Les particules générées ont un diamètre moyen de  $1,068\mu\text{m}$ .

Pour chaque maquette, les mesures ont été réalisées en mode IR pendant  $90\text{s}$  et dans le volume de sillage compris entre  $0,09 < x_c/h_c < 5,65$ ,  $-0,28 < y_c/h_c < 1,3$  et  $-0,45 < z_c/h_c < 0$ .

## 2.2 Mesures PIV (CORIA) comme données de comparaison

Les mesures PIV ont été réalisées au laboratoire CORIA à Rouen. La soufflerie utilisée est subsonique, à circuit fermé et la veine d’essais est de section carrée  $0,4\text{m} \times 0,4\text{m}$  et de longueur  $2,5\text{m}$ . Les maquettes sont les mêmes que précédemment, mais seules les 2 configurations  $\varphi = 25^\circ$  et  $\varphi = 35^\circ$  ont pu être expérimentées. Le taux de blocage au sein de la veine d’essais vaut donc  $\epsilon = 2,7\%$  contre  $4,8\%$  à l’ESTACA. On notera que les géométries étant identiques, nous nous affranchissons des différences liées à l’usinage des maquettes. L’intensité de turbulence au sein de la veine d’essais à vide est inférieure à  $1\%$ . La vitesse d’étude ( $U_\infty = 14,3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), la garde au sol ( $h_g/h_c = 0,28$ ), ainsi que le moyen de fixation des maquettes sur les parois de la veine sont également inchangés.

La technique de mesure utilisée au CORIA est la PIV. Concernant l’ensemencement, il est généré à partir de glycérol  $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$  et du générateur de fumée Fogburst 1500. Le LASER utilisé est de type  $\text{Nd} : \text{YAG}$  double cavité et émet des faisceaux de longueur d’onde  $532\text{nm}$  et d’énergie de  $121\text{mJ}$ . L’épaisseur

de la nappe obtenue est d'environ  $1mm$ . Les prises de vue de l'écoulement se font à l'aide d'une caméra HiSense Neo de DANTEC Dynamics<sup>MD</sup> de résolution  $2560px \times 2160px$ . L'acquisition des données se fait par ordinateur via le logiciel Dynamic Studio de DANTEC Dynamics<sup>MD</sup> et la méthode de traitement est l'Adaptive PIV. On précisera que les statistiques sont calculées sur 600 couples d'images acquis à une fréquence de 10Hz. Le système de traverse comprenant tout le montage optique d'émission LASER et de prise de vue est tridimensionnel.

Les mesures ont été réalisées dans les différents plans  $0,02 < y_c/h_c < 1,28$  par espacement  $\Delta y_c/h_c = 0,09$  afin d'acquérir les composantes  $u$  (commune aux mesures LDV) et  $w$  (non acquise en LDV). Chaque plan couvre la zone d'écoulement s'étendant dans l'intervalle  $0,05 < x_c/h_c < 2,48$  et  $-0,70 < z_c/h_c < 0,70$ .

## 3 Résultats

### 3.1 Estimation de la correction apportée par la nouvelle méthode de traitement ITTT des mesures LDV

Afin de rester concis, nous nous intéressons sur la correction apportée par la méthode ITTT dans un plan longitudinal du corps d'A Ahmed  $\varphi = 35^\circ$ . La figure 2(a) montre les champs de  $\hat{u}_{ITTT}/U_\infty$ . Dans la région  $x_c/h_c < 1,05$ , les vitesses longitudinales sont négatives et correspondent à la zone de recirculation. Par ailleurs, on remarque que l'écoulement est décollé sur la lunette arrière. Sur la figure 2(b), les champs de  $\hat{w}'_{ITTT}/U_\infty$  montrent les niveaux les plus élevés, de l'ordre de 30% de  $U_\infty$ , aux interfaces formées par l'écoulement asymptotique et provenant du soubassement avec la zone de recirculation. Ces résultats préliminaires sont de premier intérêt pour comprendre les corrections apportées par la méthode ITTT.

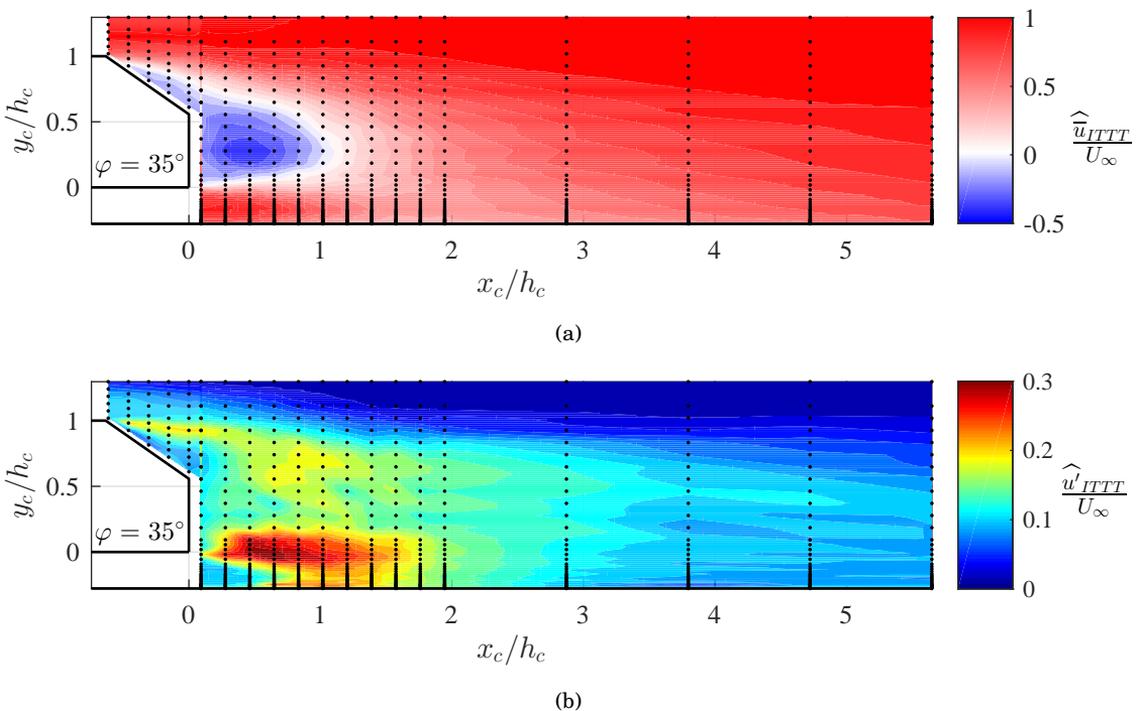


FIGURE 2 – Écoulement de sillage du corps d'A Ahmed  $\varphi = 35^\circ$  dans le plan de symétrie  $z_c/h_c = 0$  (les points noirs correspondent aux points de mesures) : (a) Champ de vitesse longitudinale  $\hat{u}_{ITTT}/U_\infty$ , (b) Champ d'intensité de turbulence  $\hat{w}'_{ITTT}/U_\infty$

Écrivons la correction totale  $(\widehat{u}_E - \widehat{u}_{ITTT})/U_\infty$  selon la décomposition suivante :

$$\frac{\widehat{u}_E - \widehat{u}_{ITTT}}{U_\infty} = \frac{\widehat{u}_E - \widehat{u}_{IT}}{U_\infty} + \frac{\widehat{u}_{IT} - \widehat{u}_{ITTT}}{U_\infty} \quad (5)$$

Dans l'équation précédente, le terme ① correspond à la correction totale. Le terme ② correspond à la correction de l'erreur aléatoire liée aux bouffées tandis que le terme ③ correspond à la correction de l'erreur systématique, puisque IT corrige l'erreur aléatoire liée aux bouffées sans rectifier l'erreur systématique.

La figure 3(a) présente les valeurs de correction dues à l'erreur aléatoire liée aux bouffées (terme ② de l'équation 5).

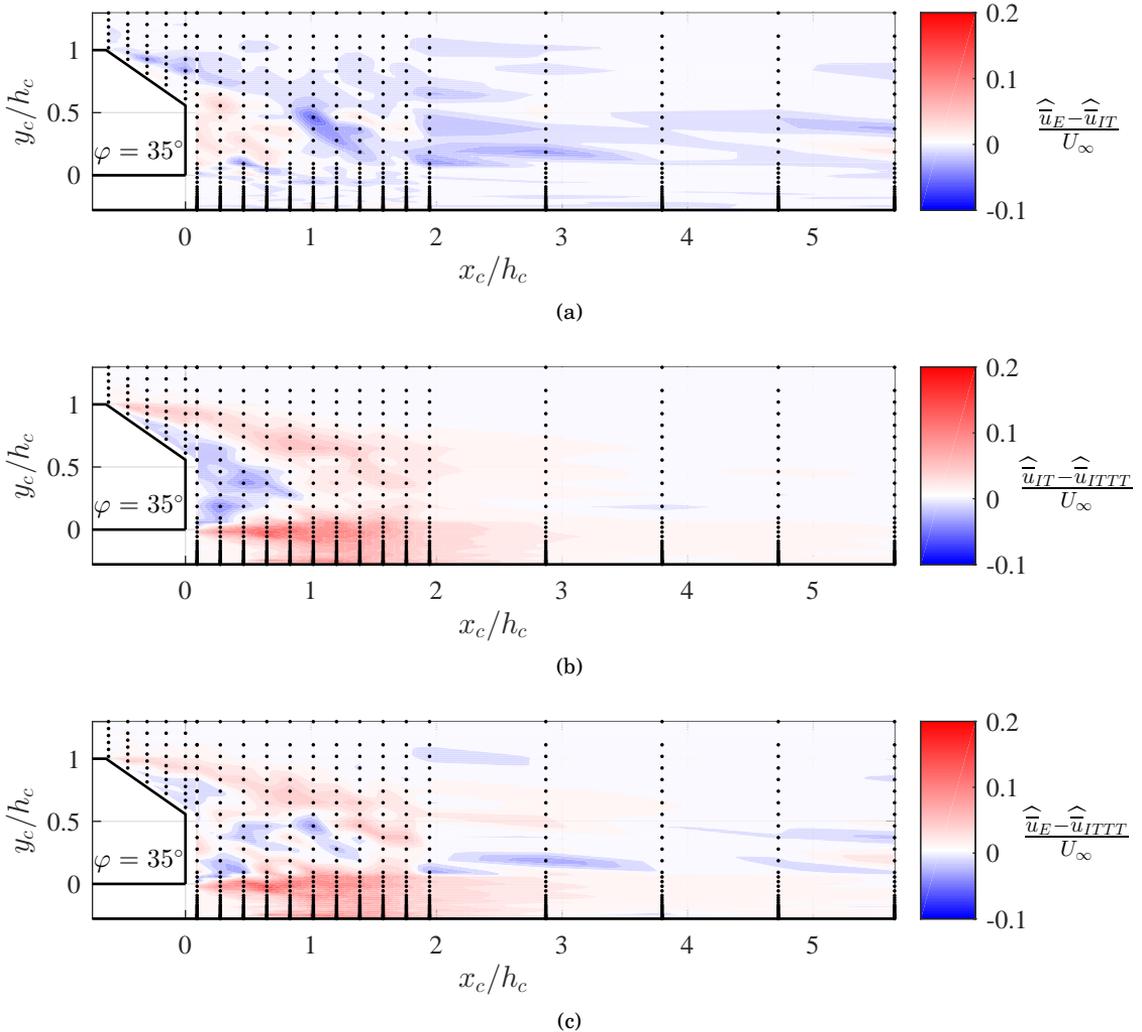


FIGURE 3 – Évaluation des corrections statistiques (équation 5) apportées par la méthode ITTT dans le plan  $z_c/h_c = 0$  du sillage du corps d'A Ahmed  $\varphi = 35^\circ$  (les points noirs correspondent aux points de mesures) : (a) Correction de l'erreur aléatoire liée aux bouffées ②, (b) Correction de l'erreur systématique sur la vitesse ③, (c) Correction totale ①=②+③

On remarque que les effets des bouffées impactent de manière aléatoire les résultats, puisque les corrections peuvent être positives ou négatives. Néanmoins, l'effet de ces bouffées survient plutôt lors

des acquisitions en proche culot dans la zone de recirculation ( $x_c/h_c < 1,05$ ) (Fig.3(a)), mais également dans la moitié basse du sillage lointain ( $x_c/h_c > 1,05$  et  $y_c/h_c < 0,5$ ). Dans ces zones, les conditions EH sont difficiles à obtenir de manière continue et avec des taux d'acquisition  $f_a$  élevés. En dehors de la zone de couche limite, le maximum de correction atteint en plusieurs points  $\pm 5\%$  de  $U_\infty$ .

La figure 3(b) trace les valeurs de correction de l'erreur systématique (terme ③ de l'équation 5). On retrouve ainsi la forte corrélation entre la valeur de la correction et l'intensité de turbulence décrite figure 2(b). Comme attendu, la correction est négative (resp. positive) dans les régions où  $\bar{u} < 0$  (resp.  $\bar{u} > 0$ ). Il s'agit d'une correction en accord avec le comportement de l'erreur systématique décrit dans la littérature [1] : les particules à haute vitesse sont plus nombreuses à être mesurées en conditions EH et par conséquent  $\hat{u}_E$  se trouve sur-estimée. En dehors de la couche limite, le maximum de correction atteint  $+13\%$  de  $U_\infty$  au point  $x_c/h_c = 0,65$  et  $y_c/h_c = -0,02$ .

Par somme des termes ② et ③, la figure 3(c) trace la correction totale des erreurs statistiques par la méthode ITTT. L'addition des deux erreurs précédentes montre la forte corrélation entre la valeur de la correction et l'intensité de turbulence, à cause de l'erreur systématique. Toutefois, l'erreur aléatoire liée aux bouffées contribue à la non-uniformité du signe de la correction en certaines zones du proche sillage notamment : en effet, l'erreur aléatoire peut augmenter l'erreur totale ou bien s'avérer être compensatrice. Le maximum de correction totale atteint  $+13\%$  de  $U_\infty$  au point  $x_c/h_c = 0,65$  et  $y_c/h_c = -0,02$ .

Pour conclure, la méthode ITTT permet une meilleure répétabilité des résultats indépendamment des conditions d'ensemencement (EH ou ENH) grâce à la suppression de l'erreur aléatoire liée aux bouffées. Par ailleurs, l'erreur systématique bien connue en LDV est également minimisée afin d'avoir des résultats sur les statistiques les plus précis possibles. Ainsi, dans la suite de cet article les différentes statistiques issues des mesures LDV seront calculées avec la méthode de traitement ITTT.

### 3.2 Comparaison des mesures LDV (ESTACA) / PIV (CORIA)

Nous comparons les résultats sur les mesures communes de  $u$  faites en LDV (ESTACA) et PIV (CORIA). Pour être synthétique, nous nous concentrons uniquement sur la configuration  $\varphi = 25^\circ$  qui est considérée comme la plus critique de par la complexité de l'écoulement engendré [7].

La figure 4 compare les iso-surfaces  $\bar{u}/U_\infty \in [0; 0,3; 0,5; 0,7]$  entre les mesures LDV (ESTACA) et PIV (CORIA) dans le sillage du corps d'Ahmed  $\varphi = 25^\circ$ . Pour information, en PIV seules les mesures dans le sillage ont été réalisées tandis que des mesures sur la lunette ont été faites en LDV.

Si l'on regarde les iso-surfaces  $\bar{u}/U_\infty = 0$  (Fig.4(a)) on s'aperçoit que le bulbe de recirculation est décrit de manière très proche en LDV et PIV. Toutefois, on observe en PIV la formation d'un petit appendice non loin de la paroi latérale et non visible en LDV. Cette différence est certainement due au manque de discrétisation dans la direction  $z_c$  en LDV, limitée à 4 plans dans la demi-largeur. Ce petit appendice de déficit de vitesse  $u$  correspond au développement de tourbillons longitudinaux issus de l'enroulement de la couche limite sur les arêtes de la lunette arrière et qui se propagent dans le sillage. Ces petits bulbes secondaires deviennent plus visibles dans la figure 4(b) définissant les iso-surfaces  $\bar{u}/U_\infty = 0,3$ , très proches en LDV et PIV. Le maillage transversal effectué en LDV semble cette fois-ci suffisant pour capter le déficit de vitesse présent dans les tourbillons longitudinaux. Concernant les iso-surfaces  $\bar{u}/U_\infty = 0,5$  (Fig.4(c)) et  $\bar{u}/U_\infty = 0,7$  (Fig.4(d)), on observe une nouvelle fois des résultats très similaires, à la différence des écoulements provenant de la lunette et du soubassement qui n'ont pas été mesurés en PIV.

Ce rendu visuel donne une bonne idée de la proximité des résultats sur  $\bar{u}$ . De manière à chiffrer la différence, on compare les longueurs de recirculation  $L_R$  (Eq.6). Pour la maquette  $\varphi = 25^\circ$ , on trouve  $L_R/h_c = 0,53$  en PIV contre  $0,58$  en LDV. Concernant la maquette  $\varphi = 35^\circ$ , on relève  $L_R/h_c = 1,06$  en PIV contre  $1,01$  en LDV. Compte tenu de l'espacement longitudinal des mesures en LDV ( $0,09h_c$ ), on remarque une grande proximité des résultats entre les deux techniques de mesures réalisées dans des conditions expérimentales similaires.

$$L_R = \max_{\bar{u}(x_c; y_c; 0) < 0} (x_c) \quad (6)$$

La figure 5 montrent les champs de  $u'/U_\infty$  dans le plan de symétrie  $z_c/h_c = 0$  du corps d'Ahmed  $\varphi = 25^\circ$  mesurés en LDV et PIV. Même si la campagne PIV ne nous a pas permis d'obtenir des informations dans la zone  $y_c/h_c < 0,02$ , on remarque que la zone de forte intensité de turbulence mesurée en LDV se retrouve dans le champ PIV avec des valeurs similaires. Toutefois, des différences sont à noter au niveau

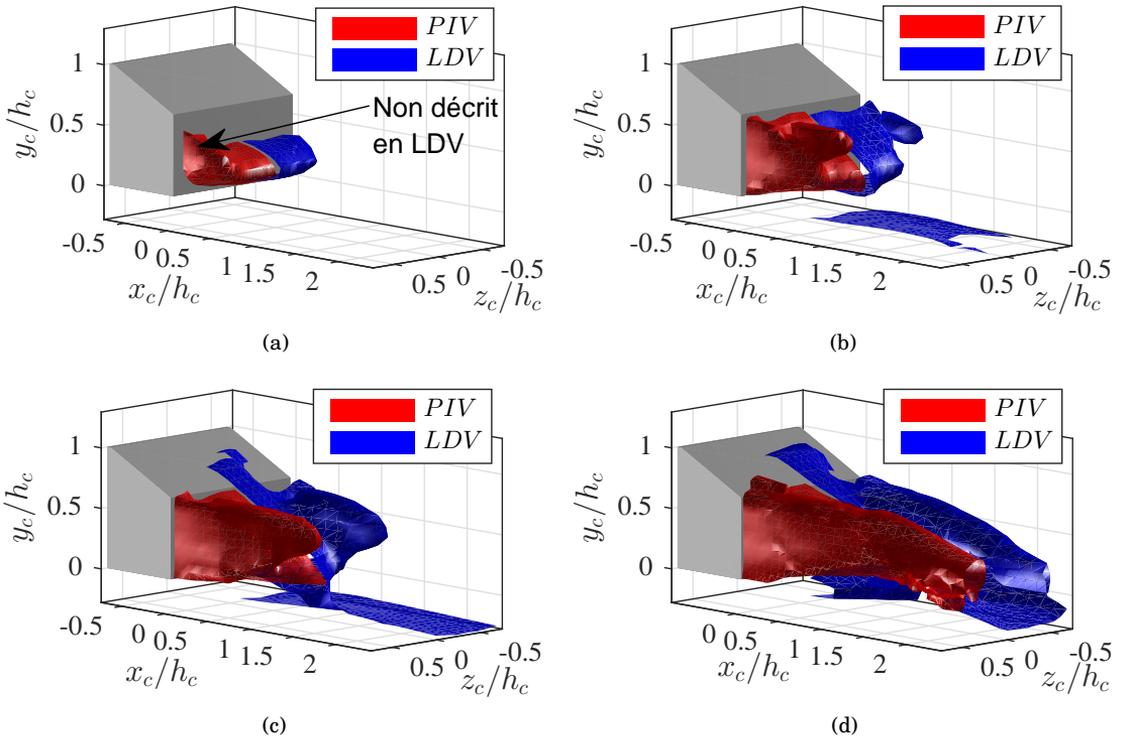


FIGURE 4 – Comparaison des iso-surfaces  $\bar{u}/U_\infty$  entre les mesures LDV (ESTACA) et PIV (CORIA) dans le sillage du corps d’Ahmed  $\varphi = 25^\circ$  : (a)  $\bar{u}/U_\infty = 0$ , (b)  $\bar{u}/U_\infty = 0,3$ , (c)  $\bar{u}/U_\infty = 0,5$  (d)  $\bar{u}/U_\infty = 0,7$

de la couche cisailée supérieure. En effet la zone mesurée en LDV  $0,3 < x_c/h_c < 0,8$  et  $0,15 < y_c/h_c < 0,45$  où  $0,15 < u'/U_\infty < 0,20$  n’apparaît dans le champ PIV qu’avec des niveaux compris entre 10% et 15%.

## 4 Conclusion et perspectives

Pour conclure, la méthode ITTT de traitement LDV permet le calcul précis des statistiques indépendamment des conditions d’ensemencement (EH ou ENH). Par ailleurs, la proximité des résultats sur  $u$  avec ceux PIV (CORIA) permet de valider d’une manière générale le protocole de la campagne de mesures LDV (ESTACA) : technique de traitement, maillage appliqué, temps d’acquisition. Cela nous permet par ailleurs de pouvoir analyser les résultats de la composante  $w$  obtenue en PIV et non mesurée en LDV, en pensant raisonnablement que les conclusions obtenues au CORIA seront également valables dans le laboratoire de l’ESTACA.

Lors de la présentation orale, plus de résultats sur la correction des erreurs aléatoires seront présentés en se focalisation sur l’impact des bouffées sur les résultats. La correction de l’erreur systématique sera également abordée plus en détails. Enfin, nous nous attarderons également sur les résultats PIV (CORIA) et LDV (ESTACA) du corps d’Ahmed  $\varphi = 35^\circ$  que nous n’avons pu aborder ici par souci de concision.

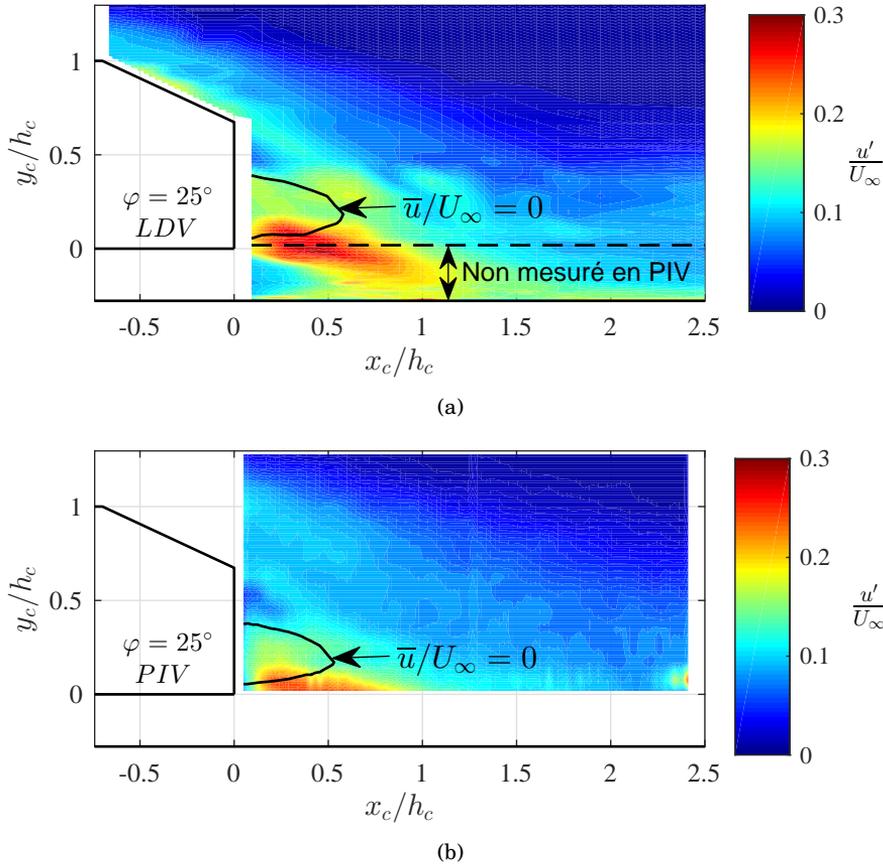


FIGURE 5 – Comparaison des résultats de  $u'/U_\infty$  dans le plan de symétrie  $z_c/h_c = 0$  du corps d'A Ahmed  $\varphi = 25^\circ$  : (a) LDV (ESTACA), (b) PIV (CORIA)

## Références

- [1] D. K. McLaughlin and W. G. Tiederman. Biasing correction for individual realization of laser anemometer measurements in turbulent flows. *Physics of Fluids*, 16 :2082–2088, 1973.
- [2] R. Rodriguez, F. Murzyn, A. Mehel, and F. Larrarte. An innovative LDV data processing method for statistical error corrections. Application to homogeneous and non-homogeneous seeding. *Flow Measurement and Instrumentation*, 60(2018) :67–77, 2018.
- [3] P. Buchhave, W. K. George, and J. L. Lumley. The Measurement of Turbulence with the Laser-Doppler Anemometer. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 11(1) :443–503, 1979.
- [4] C. Tropea, A. L. Yarin, and J. F. Foss. *Springer handbook of experimental fluid mechanics*, volume 53. 2007.
- [5] S.R. Ahmed, G. Ramm, and G. Faltin. Some Salient Features Of The Time-Averaged Ground Vehicle Wake. *SAE Technical Paper Series*, 1984.
- [6] G. S. West and C. J. Apelt. The effects of tunnel blockage and aspect ratio on the mean flow past a circular cylinder with Reynolds numbers between 10 000 and 100 000. *Journal of Fluid Mechanics*, 114 :361, 1982.
- [7] S. Krajnović and L. Davidson. Large-Eddy Simulation of the Flow around Simplified Car Model. *SAE Technical Paper Series*, 7, 2004.