



HAL
open science

Démarche d'estimation des incertitudes en PIV basée sur la méthode GUM

Guillaume Gomit, Carole Beaulieu, Patrick Braud, Laurent David

► **To cite this version:**

Guillaume Gomit, Carole Beaulieu, Patrick Braud, Laurent David. Démarche d'estimation des incertitudes en PIV basée sur la méthode GUM. 16ème Congrès Francophone de Techniques Laser pour la mécanique des fluides, CNRS, CentraleSupélec, Université Paris Saclay, IRSN, Sep 2018, Dourdan, France. hal-02097807

HAL Id: hal-02097807

<https://hal.science/hal-02097807>

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.

Démarche d'estimation des incertitudes en PIV basée sur la méthode GUM

Guillaume GOMIT¹, Carole BEAULIEU², Patrick BRAUD¹, Laurent DAVID¹

¹Institut P^r, CNRS, Université de Poitiers, ENSMA, Boulevard Marie et Pierre Curie, Futuroscope 86962, France

²LNE, Rue Raoul Follereau, 86000 Poitiers

Email auteur correspondant : guillaume.gomit@univ-poitiers.fr

Le travail présenté ici propose une procédure d'estimation des incertitudes pour des mesures type PIV basée sur la méthode GUM (Guide to the expression of Uncertainty in Measurement). La démarche proposée par la *GUM* normalise la façon de propager les incertitudes lorsque l'on dispose d'un modèle mathématique reliant la grandeur mesurée aux variables permettant sa détermination et qui représentent les sources d'incertitudes. Pour la détermination des incertitudes, relativement peu d'articles traitent du processus de mesure et suivent une procédure établie. La source d'erreur la plus étudiée, est celle provenant des algorithmes. Dans cette étude, une procédure détaillée d'estimation des incertitudes est présentée. Cette procédure est appliquée à des deux configurations de mesure 2D afin d'obtenir des cartes d'incertitude sur les champs de vitesse instantanés.

1 Introduction

La problématique de la détermination des incertitudes liées aux mesures PIV est d'actualité et de nombreux laboratoires internationaux travaillent actuellement sur leur modélisation. Comme mentionné par Wieneke (2015) [1], une estimation approximative de l'incertitude des mesures PIV est souvent utilisée dans un grand nombre d'articles. Celle-ci est souvent basée uniquement sur les incertitudes liées à la corrélation avec des valeurs de l'ordre de 0,05 à 0,1 pixel. Si les sources influençant l'incertitude de mesure PIV sont bien identifiées, la quantification de celle-ci reste une problématique importante. Ceci devient particulièrement vrai avec l'essor des applications 3D-PIV.

Les sources d'erreurs rencontrées lors de mesure PIV sont multiples : erreurs d'étalonnage, caractéristiques d'écoulement (gradients forts, petite échelle, mouvement hors plan...), dynamique des particules, blocage des pics, éclairage non uniforme, réflexion de la lumière, sensibilité des caméras... En particulier, la mesure de l'écoulement près des parois et des interfaces entre différents fluides est généralement biaisée en raison de la concentration décroissante des particules, des forts gradients dans ces zones de l'écoulement, ou des réflexions laser (Kähler (2012))[2]. Diverses méthodes d'estimation de l'incertitude basées sur le signal de corrélation ont récemment été développées. Parmi ces méthodes, nous pouvons citer Charonko et Vlachos, (2013) [3] qui se basent sur le rapport des premiers pics de corrélation ou Wieneke, (2015) [1] qui utilisent une méthode de corrélation statistique qui quantifie les différences entre les images transformées par application du champ de déplacement calculé. D'autres méthodes basées sur l'image sont disponibles dans la littérature dont : Sciacchitano et al, (2013) [4], Xue et al. (2015)[5] ou Timmins et al, (2012) [6]. Récemment, deux études, Boomsma et al. (2016) [7] et Sciacchitano et al. (2015) [8], ont comparé les performances de ces méthodes d'estimation de l'incertitude sur différentes configurations expérimentales. Ces deux études montrent que les différentes techniques d'estimation des incertitudes fournissent des résultats cohérents, mais toutes deux concluent que d'autres développements sont nécessaires pour consolider la méthodologie de quantification de l'incertitude de la PIV.

Ici, une procédure d'estimation des incertitudes de mesure PIV est proposée en se basant sur la méthode GUM (Guide to the expression of Uncertainty in Measurement)[9]. Cette démarche normalise la façon de propager les incertitudes à partir d'un modèle mathématique reliant la grandeur mesurée aux variables permettant sa détermination et qui représentent les sources d'incertitudes. Dans un premier temps, un modèle mathématique du processus de mesure est ainsi proposé. L'estimation des incertitudes-types de chaque terme et leur propagation permet ensuite de déterminer l'incertitude élargie et la contribution de chaque paramètre au résultat final. Cette procédure est d'abord appliquée à un écoulement libre 2D au sein d'un tunnel hydrodynamique. Une application sur des mesures PIV autour d'un profil d'aile est ensuite réalisée.

2 Méthodologie d'estimation des incertitudes selon la méthode GUM

Pour estimer les incertitudes associées à une mesure, il faut modéliser le problème en établissant la relation de dépendance entre la valeur à mesurer (i.e le mesurande) et les grandeurs d'entrées. L'identification des sources d'incertitudes, puis l'estimation des incertitudes associées à ces sources permet de calculer une incertitude résultante sur le mesurande. La démarche proposée par le GUM normalise la façon de propager les incertitudes lorsque l'on dispose d'un modèle mathématique reliant la grandeur estimée aux variables contenant des incertitudes. Cette démarche pour l'estimation de l'incertitude de mesure peut se résumer à 4 étapes principales :

ÉTAPE 1 : calcul du « meilleur estimateur » du résultat de mesure

- Définition du mesurande Y (ce que l'on veut mesurer)
- Analyse du processus de mesure : Une des méthodes la plus utilisée pour définir le processus est le diagramme 5M (Moyens, Méthode, Milieu, Matière, Main d'œuvre), qui permet d'analyser le processus de mesures et de lister toutes les composantes d'incertitudes
- Ecriture du modèle mathématique du processus de mesure qui relie le mesurande (Y), aux grandeurs d'influence (X_1, X_2, \dots, X_n) qui contribuent significativement à l'incertitude sous la forme $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$

ÉTAPE 2 : estimation des incertitudes-types $u(x_i)$

Cette étape permet de quantifier les incertitudes-types sur les grandeurs d'entrée du modèle (X_i) identifiées par le diagramme des 5M. On note que les différentes sources d'incertitude peuvent être évaluées par 2 méthodes dit de type A ou de type B :

- *Méthode d'évaluation de type A* : grandeur d'entrée étudiable au moyen de techniques statistiques (calcul de la moyenne et la variance à travers l'exploitation des données expérimentales).
- *Méthode d'évaluation de type B* : Utilisation des informations disponibles : certificats d'étalonnage, jugements d'experts, bibliographie,...

ÉTAPE 3 : détermination de l'incertitude-type composée

A partir du modèle mathématique ($Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$) et des incertitudes-types de chaque paramètre, l'incertitude composée est estimée à partir de la loi de propagation exprimée sous la forme :

$$u_c(Y)^2 = \sum_i^n (C_i)^2 \times (u(x_i))^2 + 2 \sum_i^{n-1} \sum_{j=i+1}^n C_i \times C_j \times u(x_i, x_j) \quad (1)$$

avec $C_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$ les coefficients de sensibilité et $u(x_i, x_j)$ est la covariance entre x_i et x_j .

Lorsque les grandeurs d'entrées sont indépendantes, on a donc simplement :

$$u_c(Y)^2 = \sum_i^n (C_i)^2 \times (u(x_i))^2 \quad (2)$$

ÉTAPE 4 : détermination de l'incertitude élargie

L'incertitude élargie s'obtient en multipliant l'incertitude composée par un facteur d'élargissement k . En pratique, une valeur de k égale à 2 est souvent utilisée. Dans le cas d'une loi normale, cela correspond à une probabilité de 95% que la valeur vraie du mesurande se trouve dans l'intervalle de confiance.

3 Méthode GUM appliquée à la PIV

Dans cette partie, nous appliquons la méthode décrite précédemment au cas d'une mesure PIV 2D. Tout d'abord, les processus de mesure doit être défini. Les sources d'incertitude de mesure peuvent être réparties en deux catégories, les facteurs expérimentaux liés à l'acquisition d'image, (éclairage, ensencement, milieu) et les facteurs liés aux traitements d'images et aux algorithmes de PIV utilisés. Afin de modéliser le processus de mesures et de répertorier les différentes sources d'incertitude, le diagramme 5M lié à une mesure PIV 2D est proposé sur la figure 1.

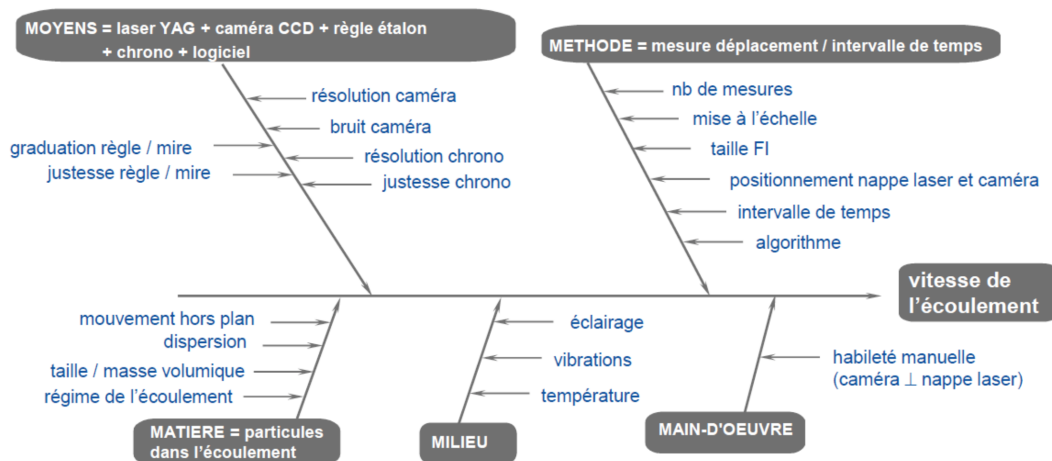


Figure 1: Diagramme 5M du processus d'une mesure PIV 2D.

En se basant sur l'analyse du processus de mesure un modèle mathématique reliant le mesurande, ici la vitesse des particules, aux grandeurs d'influence peut être exprimé sous la forme :

$$V = \frac{d(m)}{\Delta t(s)} = \frac{f_{mire} * d_{pixel} - e_{\Delta\alpha} - e_{milieu}}{\Delta t - e_{chrono}} - e_{particules} \quad (3)$$

où

- f : est rapport d'échelle évalué par détection des points de mire sur l'image où en se basant sur l'utilisation d'un réglet. Dans ce dernier cas, le facteur peut être écrit : $(L_{reglet} - e_{reglet})/D_{px/L}$ avec L_{reglet} la longueur lue sur le réglet (m), e_{reglet} erreur de justesse et $D_{px/L}$ le nombre de pixel correspondant à la distance L pour calculer le facteur de conversion (mm/pixel)
- d_{pixel} : déplacement des particules entre les deux trames PIV (pixel)
- $e_{\Delta\alpha}$: erreur liée au désalignement : angle caméra / nappe laser
- e_{milieu} : erreur liée au milieu (température, éclairage ...)
- Δt : intervalle de temps en les deux images (s) (paramétrage logiciel)
- e_{chrono} : erreur de justesse du chronomètre contrôlant le Δt (s)
- $e_{particules}$: erreur liée au glissement des particules par rapport au fluide (m/s)

Incertitude liée à l'estimation du déplacement des particules (d_{pixel})

Ce paramètre est influencé par différents paramètres du diagramme 5M défini précédemment. En particuliers, l'incertitude est liée aux algorithmes utilisés (interpolation, taille des fenêtres, nombre de passes ...), à la qualité des images (bruit, focus ...) à la qualité de l'ensemencement et aux caractéristiques de l'écoulement (fort gradient, présence de mouvement hors plan ...). Afin d'obtenir une incertitude sur l'estimation du déplacement des particules, nous nous basons sur la méthode développée par Wieneke, (2015) [1] et implémentée dans le logiciel *Davis* de la société *LaVision*. Cette méthode quantifie les

différences entre les images transformées par application du champ de déplacement calculé et l'image acquise. Contrairement à d'autre méthode qui identifie la contribution individuelle des particules, cette méthode analyse la contribution globale de tous les pixels sur la forme du pic de corrélation. L'approche repose sur l'hypothèse que l'algorithme d'interrogation PIV avec un schéma de correction-prédicteur devrait toujours donner un pic de corrélation symétrique lorsque l'algorithme est convergé, c'est à dire pour un déplacement final nul. Les auteurs ont ainsi montré que le pic de corrélation résulte des contributions non seulement des images de particules, mais aussi du bruit dans les enregistrements. L'écart-type des contributions fournit une estimation de l'asymétrie due au bruit de l'image, qui est liée à l'incertitude du vecteur de déplacement. Les auteurs ont ainsi montré que la méthode prend en compte différents facteurs comme le bruit sur lié aux images ou le mouvement hors-plan des particules affectant la fonction de corrélation.

Incertitude liée au facteur de grandissement (f)

Le facteur de grandissement permet de convertir le déplacement de pixel en dimension physique (mètre, millimètre ...). Dans un cas simple sans distorsion, ce facteur peut être obtenu à l'aide de l'image d'un réglet aligné avec la nappe laser. Dans ce cas, ce facteur est le rapport entre une longueur du réglet en unité et celle en pixels sur l'image. Cette lecture est réalisée sur l'image. Dans ce cas, deux sources d'incertitude sont introduites. Une première liée à la justesse du réglet, noté L_{reglet} et une deuxième liée à la lecture sur l'image noté D_{reglet} .

Pour L_{reglet} , la plus petite graduation est utilisée pour estimer l'incertitude, qui est de type B. Pour D_{reglet} , nous prenons une incertitude de lecture d'un pixel sur chaque point utilisé du réglet, soit deux pixels au maximum.

Pour l'erreur liée à la dimension du réglet e_{reglet} , le critère le plus répandu est l'EMT (Erreur Maximale Tolérée). Ce critère est lié à l'instrument de mesure et donné par une norme. L'incertitude liée à l'erreur de la règle est donc de type B.

Dans le cas où une mire de calibration est utilisée, l'estimation de l'incertitude est plus complexe et liée au processus d'optimisation utilisé pour définir le modèle de calibration. Cependant, une estimation de l'erreur de projection peut être utilisée.

Erreur liée aux particules ($e_{particules}$)

Le choix des particules constitue un paramètre important du processus de mesure PIV. En effet, les traceurs doivent suivre fidèlement l'écoulement. Les particules doivent être suffisamment petites et de masse volumique comparable à celle du fluide utilisé. D'autre part, elles devront également être suffisamment grosses pour être visible sur les images d'acquisition. Les équations régissant le mouvement de particules dans un écoulement fluides en fonction de leur caractéristiques sont particulièrement complexes (formulation introduite par Basset en 1888) si on souhaite tenir compte de tous les phénomènes physiques qui s'exercent dessus. Cependant, dans le cas de petites particules comme celles utilisées en PIV, la vitesse de glissement des particules maximale, v_{max} , peut être approximée par l'équation suivante (Tropea et al. (2007) [10]) :

$$v_{max} = \frac{d_p^2(\rho_p - \rho_f)}{18\mu} \quad (4)$$

avec d_p le diamètre de la particule, ρ_p et ρ_f les masses volumiques de la particule et du fluide, et μ la viscosité du fluide.

Incertitude liée à l'alignement caméra/laser $e_{\Delta\alpha}$

En pratique, l'alignement entre la nappe laser et la caméra peut être délicat (présence de paroi, accès optique restreint) (figure 2). Supposons que la nappe laser soit orientée d'un angle de α dans le plan vertical, une erreur systématique est alors introduite, défini par le terme $V_x \left(\frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right)$.

L'incertitude sur ce facteur est de type B et suit la loi de probabilité uniforme. On fera une hypothèse que l'angle de rotation se trouve dans l'intervalle $[-1^\circ, 1^\circ]$.

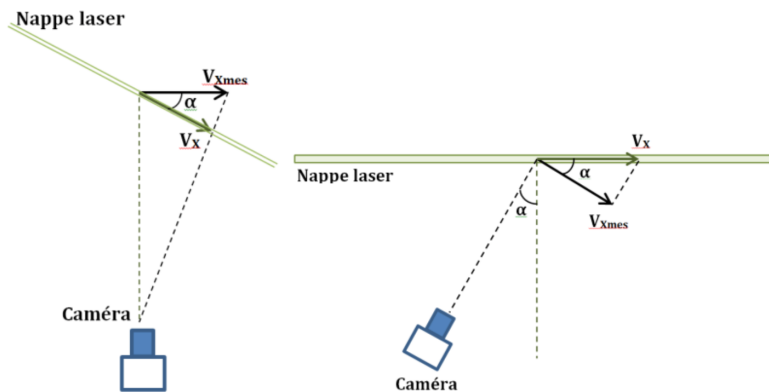


Figure 2: Erreurs d'alignement nappe laser / caméra.

Incertitudes liées au chronomètre Δt

Des erreurs sont introduites sur le temps inter-frame. Cela dépend essentiellement de la résolution du chronomètre et de sa justesse. Les lasers PIV typiques montrent une légère déviation par rapport au comportement attendu, particulièrement lorsqu'ils sont utilisés sur une longue période de temps. Une valeur de 50 ns est considérée comme référence pour estimer l'incertitude du chronomètre. L'incertitude est donc type B et suit la loi de probabilité uniforme. De plus la résolution du chronomètre de l'ordinateur est de 1 ns.

Incertitudes liées au milieu e_{milieu}

Ces incertitudes sont liées à différentes sources listées dans le diagramme 5M tels que la température, l'éclairage ou les vibrations. Dans les travaux de la littérature, l'erreur liée au milieu est très peu étudiée. En pratique, on cherche à minimiser l'influence du milieu en stabilisant les conditions environnementales (supprimer les vibrations, optimiser l'éclairage...). Earl et al (2014) [11] par exemple corrige les vibrations du dispositif expérimental à chaque instant avant d'effectuer la corrélation. Un travail reste cependant nécessaire afin de permettre l'influence de ces sources sur l'incertitude de mesure.

4 Application à des mesures PIV 2D

La procédure décrite précédemment est tout d'abord appliquée au sein d'un tunnel hydrodynamique à un écoulement libre dont la vitesse est d'environ 1 m/s. L'écoulement estensemencé avec des particules polyamides (VESTOSINT®2178). La masse volumique d'une particule est de $1,02 \text{ g/cm}^3$ et son diamètre médian est de $20 \mu\text{m}$. La concentration des particules a été ajustée pour avoir environ 8 particules présentes dans une fenêtre d'interrogation de 32×32 pixels. Un laser YAG dont l'énergie maximum par pulse laser est de 180 mJ a été utilisé pour l'ensemble des campagnes de mesures. L'intervalle de temps Δt entre les images PIV a été fixé à 900 μs . Cet intervalle de temps a été choisi pour avoir un dPIXELS de 10 pixels environ. Une caméra *Imager Intense (LaVision)* avec une résolution de 1376×1040 pixels a été utilisée. Une attention particulière a été portée sur l'alignement entre la caméra et la nappe laser. Pour cela, l'axe de caméra a été réglé perpendiculairement à la paroi du tunnel avec une incertitude inférieure au demi-degré. De plus, la nappe laser est réglée parallèle à cette paroi. Pour se placer dans le cadre simple de la procédure décrite dans la partie 2, la calibration de l'image a été réalisée en prenant une image d'un régle aligné avec la nappe laser.

Le logiciel DaVis 8.4 de la société *LaVision* a été utilisé, pour synchroniser le système PIV et réaliser les traitements. Un algorithme de PIV itératif multi-passes est utilisé pour évaluer le déplacement des particules. La première passe est effectuée sur des fenêtres de dimension 64×64 pixels et la passe finale sur des fenêtres de dimension 32×32 pixels. On impose un taux de recouvrement des fenêtres d'interrogation de 50% dans les deux directions. L'incertitude sur le déplacement estimé est calculée par la méthode de « corrélation statistique » décrite dans la partie précédente. Un exemple de champs

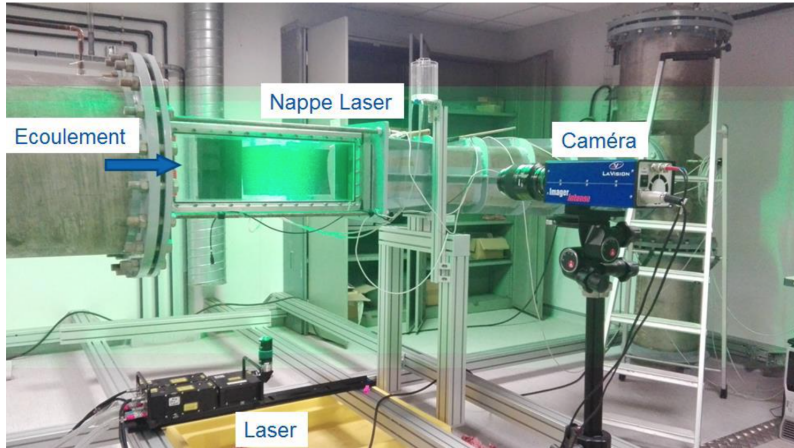


Figure 3: Montage expérimental.

de vitesse instantané et de l'incertitude sur le déplacement estimé par l'algorithme est présenté sur la figure 4. Le champ de vitesse présente des variations maximales de l'ordre de 5% avec un écart-type moyen de l'ordre de 1%. Ceci est cohérent avec le taux de turbulence au sein du tunnel hydrodynamique. Concernant les incertitudes sur le déplacement des particules, des valeurs maximales de l'ordre de 0,09 pixel sont observées.

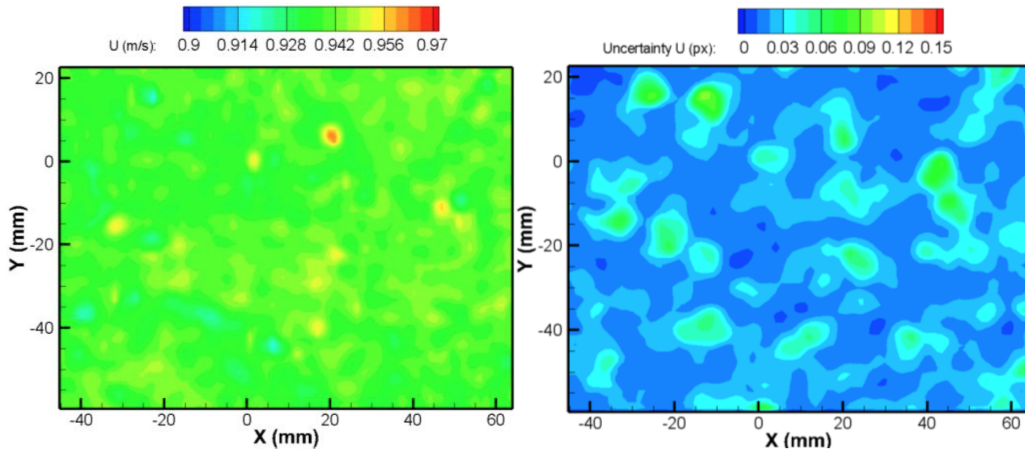


Figure 4: Champ de vitesse instantané (gauche) et champ associé d'incertitude sur le déplacement en pixel estimé selon la méthode proposée par [1].

Pour déterminer les incertitudes sur la vitesse, la méthode basée sur le GUM est appliquée à chaque vecteur du champ instantané en reprenant les étapes décrite précédemment. Pour présenter les calculs, la méthode est détaillée sur un point de mesure. Les différentes sources d'incertitudes, leur détermination et la valeur de l'incertitude type de chaque facteur est détaillé dans le tableau 1. Ceci correspond à l'étape 2 de la méthode GUM. Comme indiqué précédemment, l'incertitude liée au milieu a été négligée. On note également que la vitesse de glissement des particules est ici très faible, de l'ordre de 4 $\mu\text{m/s}$.

A partir de l'incertitude type de chaque paramètre, l'incertitude composée est estimée à partir de la loi de propagation (équation 1). Ici, les grandeurs d'entrées sont considérées indépendantes et l'équation 2 est utilisée. L'incertitude composée est alors estimée de la façon suivante :

$$u_c(v) = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (C_i)^2 \times (u(x_i))^2} = 0,00293\text{m/s} \quad (5)$$

A partir de ce calcul, la contribution de chaque paramètre à l'incertitude composée globale peut-être es-

x_i			$u(x_i)$
Grandeur	Valeur	Détermination	
$L_{\text{règle}}$ Longueur lue sur réglet (m)	80 mm	appréciation au $\frac{1}{4}$ de mm	$7,22 \cdot 10^{-5}$ m
$e_{\text{règle}}$ erreur de justesse règle graduée	0 mm	EMT = 0,05 mm (ISO 2768, classe II)	$2,89 \cdot 10^{-5}$ m
$D_{\text{règle}}$ Nombre de pixels correspondant à la distance L	942 px	comptage +/- 2 px	2 px
d_{pixel} Déplacement des particules (pixel)	10,04825 px	Corrélation statistique	0,02018 px
$e_{\Delta\alpha}$ angle caméra / nappe laser	0 mm	$(Ld/D)x(1-\cos\alpha)$ avec α +/- 1°	$7,51 \cdot 10^{-8}$ m
e_{milieu} erreur liée au milieu	0 mm	négligeable pour cette configuration (eau, faible vitesse)	~ 0 m
Δt intervalle de temps (s)	900 μ s	paramétrage à 1 ns	$2,89 \cdot 10^{-10}$ s
e_{chrono} erreur de justesse chronomètre (s)	0	EMT = 50 ns	$2,89 \cdot 10^{-8}$ s
$e_{\text{particules}}$ adéquation particules/écoulement	0 mm	Formule vitesse de glissement (m/s)	4 μ m/s

Table 1: Incertitude type de chaque paramètre influençant le mesurande.

x_i	$u(x_i)$	C_i	$ C_i \cdot u(x_i)$	%
$L_{\text{règle}}$	$7,22 \cdot 10^{-5}$ m	$\sim d/D\Delta t$ [s^{-1}]	$8,56 \cdot 10^{-4}$ m/s	8,5 %
$e_{\text{règle}}$	$2,89 \cdot 10^{-5}$ m	$\sim -d/D\Delta t$ [s^{-1}]	$3,43 \cdot 10^{-4}$ m/s	1,5 %
$D_{\text{règle}}$	2 px	$\sim -Ld/\Delta t D^2$ [$m \cdot px^{-1} \cdot s^{-1}$]	$2,02 \cdot 10^{-3}$ m/s	48 %
d_{pixel}	0,02018 px	$\sim L/D\Delta t$ [$m \cdot px^{-1} \cdot s^{-1}$]	$1,91 \cdot 10^{-3}$ m/s	42 %
$e_{\Delta\alpha}$	$7,51 \cdot 10^{-8}$ m	$\sim -1/\Delta t$ [s^{-1}]	$8,35 \cdot 10^{-5}$ m/s	< 1 %
Δt	$2,89 \cdot 10^{-10}$ s	$\sim -Ld/D\Delta t^2$ [$m \cdot s^{-2}$]	$3,05 \cdot 10^{-7}$ m/s	< 1 %
e_{chrono}	$2,89 \cdot 10^{-8}$ s	$\sim -Ld/D\Delta t^2$ [$m \cdot s^{-2}$]	$3,05 \cdot 10^{-5}$ m/s	< 1 %
$e_{\text{particules}}$	4 μ m/s	-1	$4,00 \cdot 10^{-6}$ m/s	< 1 %

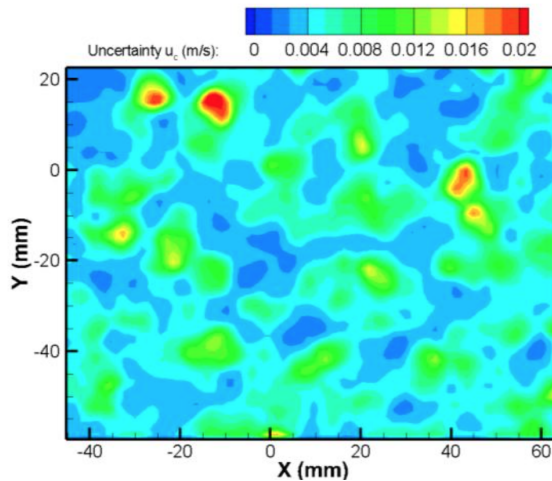
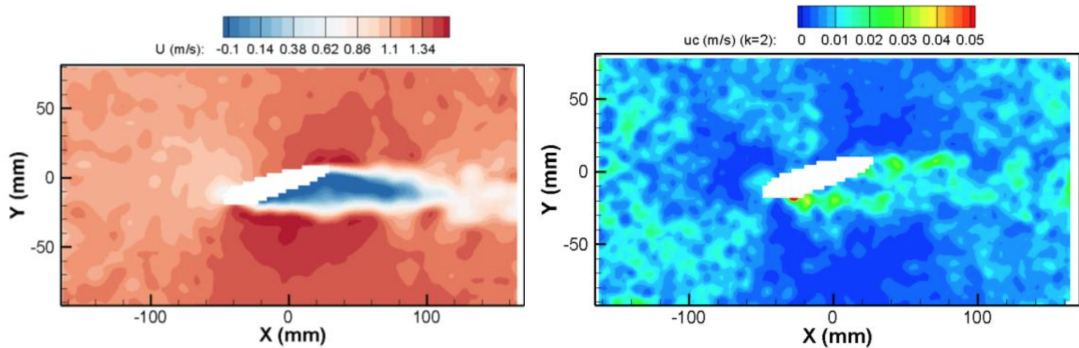
Table 2: Calcul de l'incertitude composée et contribution de chaque paramètres à l'incertitude totale.

timée. Le tableau 2 présente les résultats de cette étape. Ici, les facteurs liés à la calibration de l'image et à l'estimation du déplacement des particules sur l'image sont prépondérants et représentent 98,5 % de l'incertitude totale. L'utilisation d'une mire de calibration pourrait permettre de réduire cette incertitude. Dans ce cas, un calcul plus complexe de l'incertitude type liée aux facteurs d'échelle devra être implémenté.

La dernière étape de la méthode est la détermination de l'incertitude élargie. Celle-ci s'obtient en multipliant l'incertitude composée par le facteur d'élargissement k . Ici, une valeur standard de ce coefficient $k = 2$ est utilisée. Le résultat de mesure final au point considéré s'écrit donc :

$$U = 0,9482 \pm 0,0059 \text{m/s} (k = 2) \quad (6)$$

L'incertitude estimée dans ce cas est de l'ordre de 0,63% de la valeur mesurée. Ce calcul est réalisé sur l'ensemble des vecteurs vitesse du champ. Ainsi un champ d'incertitudes instantané peut-être représenté (figure 5). Ici, le champ d'incertitudes est directement relié aux incertitudes sur le déplacement, l'incertitude liée à la calibration étant considérée constante sur l'ensemble du champ. Des valeurs maximales de l'ordre de 2% de la vitesse sont observées dans le champ. La même procédure d'estimation des incertitudes a été appliqué à un écoulement autour d'un profil NACA (Reynolds = 100 000). Un champ instantané de vitesse et le champ d'incertitudes associé (avec $k = 2$) sont fournis sur la figure 6. Les zones comportant les plus fortes valeurs d'incertitudes se trouvent dans les zones de cisaillement en aval du profil. Ceci est essentiellement dû à la contribution de l'incertitude liée à l'algorithme PIV qui augmente dans les zones présentant de fort gradient.


 Figure 5: Champ d'incertitude instantané avec $k = 2$

 Figure 6: Champs de vitesse instantané et champ d'incertitude instantané avec $k = 2$

5 Conclusion

Une procédure d'estimation des incertitudes basée sur la méthode GUM a été appliquée à des mesures PIV. Cette procédure normalise la façon de propager les incertitudes lorsque l'on dispose d'un modèle mathématique qui relie le mesurande aux variables permettant sa détermination. Une application à des deux configurations de mesure 2D a été présentée et permet d'obtenir des cartes d'incertitude sur les champs de vitesse instantanés.

Les cas simples considérés ici ont permis de mettre en place ce processus d'estimation des incertitudes. Cependant plusieurs points restent à traiter afin d'obtenir une estimation plus fiable de l'incertitude sur des mesures plus complexes. Ainsi, lorsqu'une mire de calibration est utilisée, une procédure d'estimation des incertitudes locales basée sur le processus de détermination des modèles de caméra devra être mise en place. De plus, dans notre étude, les incertitudes liées au milieu, comme les vibrations, ont été négligées. Un travail sur les contributions des facteurs liés au milieu est donc nécessaire. Enfin, une application à des mesures tridimensionnelles (SPIV ou TPIV) peut être envisagée.

References

- [1] Wieneke, B. PIV uncertainty quantification from correlation statistics. *Measurement Science and Technology*, 26(7), 074002, 2015
- [2] Kähler, C. J., Scharnowski, S., Cierpka, C. On the uncertainty of digital PIV and PTV near walls. *Experiments in fluids*, 1-16., 2012

- [3] Charonko, J. J., Vlachos, P. P. Estimation of uncertainty bounds for individual particle image velocimetry measurements from cross-correlation peak ratio. *Measurement Science and Technology*, 24(6), 065301, 2013
- [4] Sciacchitano, A., Wieneke, B., Scarano, F. PIV uncertainty quantification by image matching. *Measurement Science and Technology*, 24(4), 045302, 2013
- [5] Xue, Z., Charonko, J. J., et Vlachos, P. P. Particle image pattern mutual information and uncertainty estimation for particle image velocimetry. *Measurement Science and Technology*, 26(7), 074001, 2015
- [6] Timmins, B. H., Wilson, B. W., Smith, B. L., Vlachos, P. P. A method for automatic estimation of instantaneous local uncertainty in particle image velocimetry measurements. *Experiments in Fluids*, 1-15, 2012.
- [7] Boomsma, A., Bhattacharya, S., Troolin, D., Pothos, S., Vlachos, P. A comparative experimental evaluation of uncertainty estimation methods for two-component PIV. *Measurement Science and Technology*, 27(9), 094006, 2016.
- [8] Sciacchitano, A., Neal, D. R., Smith, B. L., Warner, S. O., Vlachos, P. P., Wieneke, B., Scarano, F. Collaborative framework for PIV uncertainty quantification: comparative assessment of methods. *Measurement Science and Technology*, 26(7), 074004, 2015
- [9] Guide to the expression of Uncertainty in Measurement. JCGM 100 : 2008 GUM 1995 with minor corrections, 1995
- [10] Tropea, C., Yarin, A. L. Springer handbook of experimental fluid mechanics (Vol. 1), 2007
- [11] Earl, T. A., Cochard, S., Thomas, L., Tremblais, B., David, L. Implementation of vibration correction schemes to the evaluation of a turbulent flow in an open channel by tomographic particle image velocimetry. *Measurement Science and Technology*, 26(1), 015303, 2014