



HAL
open science

Implémentation d'un nouveau modèle de caméra à correction discrète pour résoudre les problèmes de variations d'indice de réfraction dans les mesures de tomo-PIV

Gwenaël Acher, Lionel Thomas, Benoit Tremblais, Laurent David

► To cite this version:

Gwenaël Acher, Lionel Thomas, Benoit Tremblais, Laurent David. Implémentation d'un nouveau modèle de caméra à correction discrète pour résoudre les problèmes de variations d'indice de réfraction dans les mesures de tomo-PIV. 16ème Congrès Francophone de Techniques Laser pour la mécanique des fluides, CNRS, CentraleSupélec, Université Paris Saclay, IRSN, Sep 2018, Dourdan, France. hal-02097676

HAL Id: hal-02097676

<https://hal.science/hal-02097676>

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.

Implémentation d'un nouveau modèle de caméra à correction discrète pour résoudre les problèmes de variations d'indice de réfraction dans les mesures de tomo-PIV

Gwenaél ACHER¹, Lionel THOMAS¹, Benoit TREMBLAIS², Laurent DAVID¹

¹ Institut PPRIME, UPR3346, CNRS – Université de Poitiers – ISAE-ENSMA, France

¹ Université de Poitiers, Laboratoire XLIM, Axe ASALI/SRI, CNRS 7252, France

Email auteur correspondant : gwenael.acher01@univ-poitiers.fr

Le calcul des modèles de caméra est une opération cruciale pour le succès de mesures de tomo-PIV. Dans des configurations extrêmes, lorsque des interfaces optiques entrent en jeu ou que des variations d'indice de réfraction apparaissent dans la zone de mesure, les modèles de caméra analytiques ne peuvent pas toujours assurer les opérations de projection avec une précision satisfaisante. Cette incapacité à représenter la projection réelle peut conduire à des erreurs importantes sur les champs de vitesse calculés. Afin de surmonter ces difficultés, un nouveau modèle de caméra basé sur l'association d'un modèle sténopé et d'une correction locale discrète est présenté dans cet article. Avec ce modèle, la projection et la rétroprojection sténopé sont ajustées avec une correction discrète stockée dans deux grilles adaptatives dédiées. Ces grille de correction, dont la structure est optimisée en terme de performance de calcul et d'espace de stockage, sont calibrées à l'aide d'une procédure basée sur la triangulation de particules image. La calibration et le fonctionnement de ce modèle font l'objet de cet article. Les performances du modèles sont évaluées par l'étude d'un cas simulé et numérique, basés sur la calibration d'une expérience de tomo-PIV à profondeur de champ élevée dans un aquarium à parois de verre. La profondeur de champ élevée associée aux interfaces optiques et aux changements de milieux rend la calibration difficile. Dans cette configuration, la correction discrète proposée a pu réduire avec succès l'erreur de triangulation de 1 *pixel* à une valeur inférieure à 0.01 *pixel*. Ce modèle permet également la prise en compte de discontinuités dans les fonctions de projection et peut être utilisé lorsqu'il y a des interfaces optiques présentes dans le volume de mesure. Il ouvre, de ce fait, de nouvelles perspectives pour l'étude des interactions fluide-structure avec l'utilisation de solides transparents.

1 Introduction

La mise en œuvre de la procédure de calibration et le calcul du modèle de caméra sont des opérations critiques lors de la réalisation de mesures de vélocimétrie par image de particules tomographique (tomo-PIV). De nombreuses publications ont souligné l'importance de cette opération [1], analysé l'impact de sa précision sur la mesure [2] et même proposé des solutions pour améliorer la calibration des caméras [3]. Malgré le soin apporté à cette opération, dans certaines configurations expérimentales, les erreurs de projection restent trop importantes pour réaliser le calcul de champs de vitesse avec une précision satisfaisante. L'étude d'un jet chaud en écoulement transverse [4], révèle que l'emploi de techniques de correction de calibration ne suffit pas à atteindre une précision suffisante dans l'ensemble du volume de mesure, en particulier dans les zones de gradients thermiques. Afin de surmonter cette difficulté, la zone de mesure a été découpée en deux sous-volumes calibrés de manière indépendante. Diverses configurations expérimentales, telles que la mesure de vitesse en écoulement compressible, en milieu réactif [5], où même dans en milieu de densité constante à travers des hublots à géométrie complexe, peuvent générer ce type de difficultés.

Les problèmes rapportés sont causés par des variations locales d'indice de réfraction. Lorsque ces variations sont suffisamment petites en intensité et associées à de faibles gradients, le problème peut être résolu par l'utilisation de modèles de caméra d'ordre élevé. Cependant, lorsque les gradients deviennent trop importants, un modèle de caméra continu ne peut s'adapter à de telles variations locales et

intenses.

Pour palier ces difficultés, nous présentons, dans cet article, un nouveau modèle de caméra linéaire enrichi de corrections discrètes. Ce modèle permet de prendre en compte des variations locales d'indice de réfraction avec de forts gradients et même des discontinuités si la grille de correction est localement suffisamment raffinée. Il s'adapte à des configurations dans lesquelles des déviations lumineuses sévères apparaissent et s'avère utile lorsque des interfaces transparentes sont présentes sur la ligne de vue des caméras [6] ou encore lorsque des changements d'indice de réfraction apparaissent dans le champ de mesure. Ce modèle innovant permet de résoudre les problèmes de changements d'indice optique dans la zone de mesure et offre de nouvelles perspectives pour aborder l'étude des interactions fluide-structure avec des solides transparents.

2 Principe de fonctionnement du modèle de caméra

Le modèle de caméra présenté repose sur l'association d'un modèle sténopé classique et d'une correction locale discrète. Les corrections sur la projection et la rétroprojection sont stockées dans deux structures adaptatives dédiées. Ces corrections dépendent des trois dimensions de l'espace physique et sont calculées lors d'une procédure de calibration décrite dans la section suivante. La projection est calculée comme la somme de la projection sténopé et d'une correction en coordonnées pixel (du, dv) dépendant de la localisation du point à projeter (eq. 1). La correction étant stockée comme une fonction de l'espace physique, la rétroprojection est calculée en deux étapes : dans un premier temps, la rétroprojection sténopé est calculée, donnant un point (X', Y', Z') , ensuite la correction (dX, dY) , déterminée en fonction de la position (X', Y', Z') est ajoutée (eq. 2).

$$\begin{cases} (u, v) = \Psi(X, Y, Z) + (du(X, Y, Z), dv(X, Y, Z)) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} (X, Y, Z) = \Psi^{-1}(u, v, Z) + (dX(\Psi^{-1}(u, v, Z)), dY(\Psi^{-1}(u, v, Z)), 0) \end{cases} \quad (2)$$

3 Calibration du modèle

La calibration du modèle de caméra proposé est réalisée en deux étapes. La première étape correspond à la calibration traditionnelle du modèle sténopé à l'aide du déplacement d'une mire de calibration. Les méthodes classiques étant parfaitement adaptées pour réaliser cette opération, cet aspect n'est pas présenté dans cet article. Une fois le modèle sténopé calibré, et éventuellement amélioré par des procédés de corrections de calibration tels que la volume self calibration [3], le calcul des corrections discrètes peut commencer.

Comme de nombreux algorithmes de correction de calibration, la procédure repose sur la triangulation de particules physique à partir d'images de particules. Son principe de fonctionnement est brièvement décrit ici et détaillé dans les sections suivantes.

Toutes les particules sont détectées dans les images acquises simultanément par les différentes caméras. À partir de ces particules image détectées, les positions les plus probables des particules physiques sont calculées ainsi que leur erreur de reprojexion. À partir de ces listes de particules, une erreur de reprojexion statistiquement représentative est calculée au sein de petites boîtes volumiques afin d'initialiser la correction à utiliser durant la projection. La correction pour la rétroprojection est calculée de manière similaire. À la fin de la procédure, les corrections locales sont stockées et la procédure itérée avec une triangulation chaque fois plus performante puisque les corrections locales sont affinées à chaque itération.

Le processus de calibration de correction est décrit pour un set de quatre caméras, car il s'agit de la configuration classique pour la tomo-PIV, mais il s'applique de manière identique pour un nombre de caméra quelconque. Pour la première itération de la procédure, les corrections sont initialisées à zéro. Les opérations de projections s'appuient donc uniquement sur le modèle sténopé calculé précédemment, d'où l'importance de réaliser une calibration soignée. La procédure de calibration des corrections est décomposée en deux étapes majeures: la triangulation et le calcul des grilles de correction.

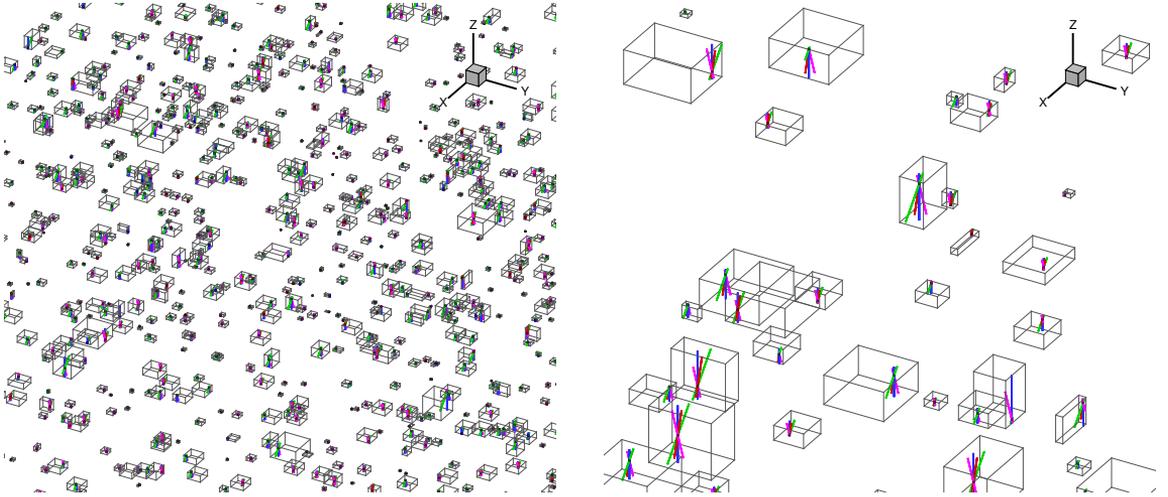


Figure 1: Particules triangulées avec leur boîte de détection et les lignes de vues associées

Etape 1: Triangulation

Afin d'obtenir une liste de particules triangulées fiable, il est fortement recommandé que la procédure de triangulation soit réalisée avec une faible densité de particules lors des premières itérations. L'idéal étant d'utiliser des images acquises avec une densité de particules faible, il est néanmoins possible de réaliser la triangulation avec un pourcentage des particules les plus brillantes, si de telles images ne sont pas disponibles. La densité de particules (ou le pourcentage de particule à écarter) est à déterminer en accord avec l'erreur de projection prévue. La procédure de triangulation commence par la localisation des particules dans chacune des quatre images acquises simultanément. Elle repose sur le principe qu'une particule physique est localisée de manière non ambiguë si quatre et seulement quatre lignes de vue intersectent une petite boîte tridimensionnelle. Partant de ce principe, la triangulation est implémentée de la manière suivante: Dans un premier temps, une boîte mère tridimensionnelle, correspondant au volume d'intérêt est définie. Toutes les lignes de vues, partant des particules image détectées, intersectant la boîte sont identifiées. La boîte est découpée en huit sous-boîtes avec chaque découpage passant par son centre de masse. Le processus est répété pour chaque nouvelle boîte jusqu'à ce que l'une des deux situations suivantes se produise. Soit, pour au moins une image, il n'existe pas de ligne de vue qui intersecte la boîte, alors il n'y a aucune particule localisée dans cette boîte et elle est supprimée. Soit, une unique ligne de vue provenant de chaque image intersecte la boîte, alors la boîte contient une particule et elle est stockée.

A la fin du processus, il reste donc une liste de boîtes dans lesquelles se trouve une probable particule physique. Sa position est calculée soit en minimisant la distance entre la particule et ses lignes de vue, soit en minimisant l'erreur de reprojection de cette particule. Cette opération est répétée sur autant de quadruplet d'image que nécessaire pour converger les statistiques calculées dans la seconde étape de la procédure de calibration de la correction. Une liste de particules triangulées est représentée avec ses boîtes et lignes de vues sur la figure 1.

Etape 2: Calcul de la correction

Les particules physiques, ainsi localisées, sont reprojétées sur les quatre images afin de déterminer l'erreur de reprojection. Elle est calculée comme la différence entre le centre de la particule image détectée et le centre de la projection de la particule physique. De manière similaire, la correction pour la rétroprojection est calculée comme la différence entre le centre de la particule physique localisée et la rétroprojection de la particule image dans le plan Z de la particule physique (eq. 3).

$$(dX, dY, 0) = (X_{triangule}, Y_{triangule}, Z_{triangule}) - \Psi^{-1}(u, v, Z_{triangule}) \quad (3)$$

La correction est stockée dans une grille tridimensionnelle à découpage adaptatif, qui présente l'avantage de réduire le coût de calcul ainsi que l'espace de stockage alloué à la correction. La grille,

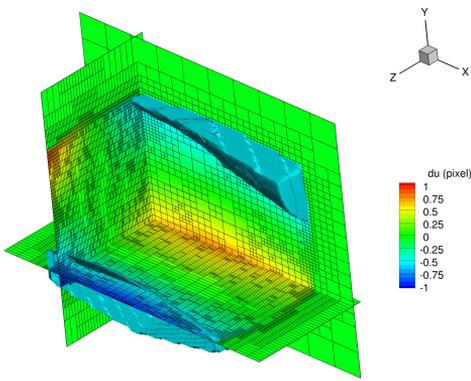


Figure 2: Composante horizontale de la correction sur la projection (du)

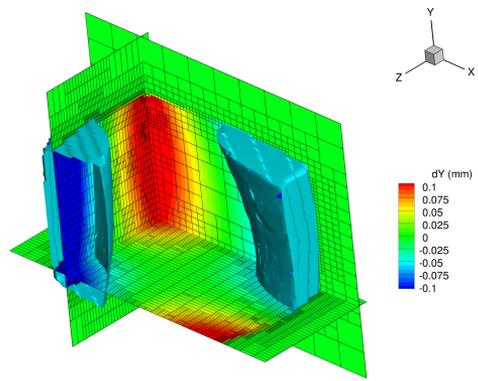


Figure 3: Composante verticale de la correction sur la rétroprojection (dY)

de taille similaire au volume d'intérêt, est initialisée avec un nombre de cellules donné. La correction est déterminée à chaque nœud (sommets du pavé droit) par le calcul d'une correction statistiquement représentative d'une zone de recherche tridimensionnelle centrée sur le nœud. Une fois le premier niveau initialisé, la valeur au centre de chaque cellule est calculée de manière similaire et comparée à la valeur obtenue par interpolation à l'aide des nœuds voisins. Si l'erreur d'interpolation, définie comme la différence entre les deux valeurs calculées précédemment, est supérieure à un seuil de précision fixé; alors la discrétisation locale n'apporte pas un niveau de précision satisfaisant et la cellule est coupée en deux dans chaque direction donnant naissance à huit nouvelles cellules. Les nœuds de toutes les nouvelles cellules créées sont calculés et le test de nouveau appliqué. Les cellules sont découpées jusqu'à ce que l'erreur d'interpolation devienne inférieure au critère fixé ou qu'un critère de découpage maximal soit atteint. A la fin de la procédure, on obtient donc un grille de correction dont l'erreur est contrôlée. La grille de correction pour la rétroprojection est calculée de manière identique.

La première itération est à ce point terminée et la procédure recommence bénéficiant d'une triangulation plus performante, puisque la rétroprojection est maintenant corrigée. Le processus est itéré jusqu'à atteindre la précision souhaitée.

4 Cas Simulé

Un cas d'étude simulé a été généré afin d'évaluer la qualité du modèle de caméra corrigé et la robustesse de sa procédure de calibration. La configuration simulée recrée une expérience de tomo-PIV dans un tunnel hydrodynamique. Les caméras sont arrangées en pyramide à base rectangulaire avec un angle de $\pm 25^\circ$ autour de l'axe vertical et $\pm 15^\circ$ autour de l'axe horizontal. Les caméras sont positionnées à 870 mm de l'origine du volume et une paroi de verre de 5 mm d'épaisseur séparant l'air et l'eau est placée entre $z = 120\text{ mm}$ et $z = 125\text{ mm}$. La zone de mesure, de taille $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 100\text{ mm}$, est définie par l'intersection des volumes vus par les quatre caméras entre les plans $z = 0\text{ mm}$ et $z = 100\text{ mm}$.

Les volumes de particules sont générés avec une densité produisant un ratio de particule par pixel $ppp = 0.02$. Les images sont générées en utilisant des projections de rayons à travers les interfaces. Les calibrations du modèle sténopé et du modèle polynomial tel que utilisé par Soloff [7] sont réalisées avec un set de particules appariées avec leurs projections. Cette opération de calibration est considérée comme optimale et équivalente à une calibration classique suivie d'une correction de calibration idéale.

Le modèle corrigé est initialisé avec le modèle sténopé calculé précédemment. Ensuite la procédure de calibration de la correction est réalisée d'une part sur les particules projetées, ce qui élimine les erreurs liées à la détection, et d'autre part sur les particules détectées dans les images. Les corrections calculées pour la projection et le rétroprojection sont représentées en figure 2 et 3. Elles sont incluses dans l'intervalle $[-1.0; 1.0]\text{ pixel}$ pour la projection et $[-0.25; 0.25]\text{ mm}$ pour la rétroprojection.

Les trois modèles de caméra calculés sont comparés au modèle rayon utilisé pour la génération des données. L'erreur de localisation et de triangulation sont toutes deux analysées. L'erreur sur la

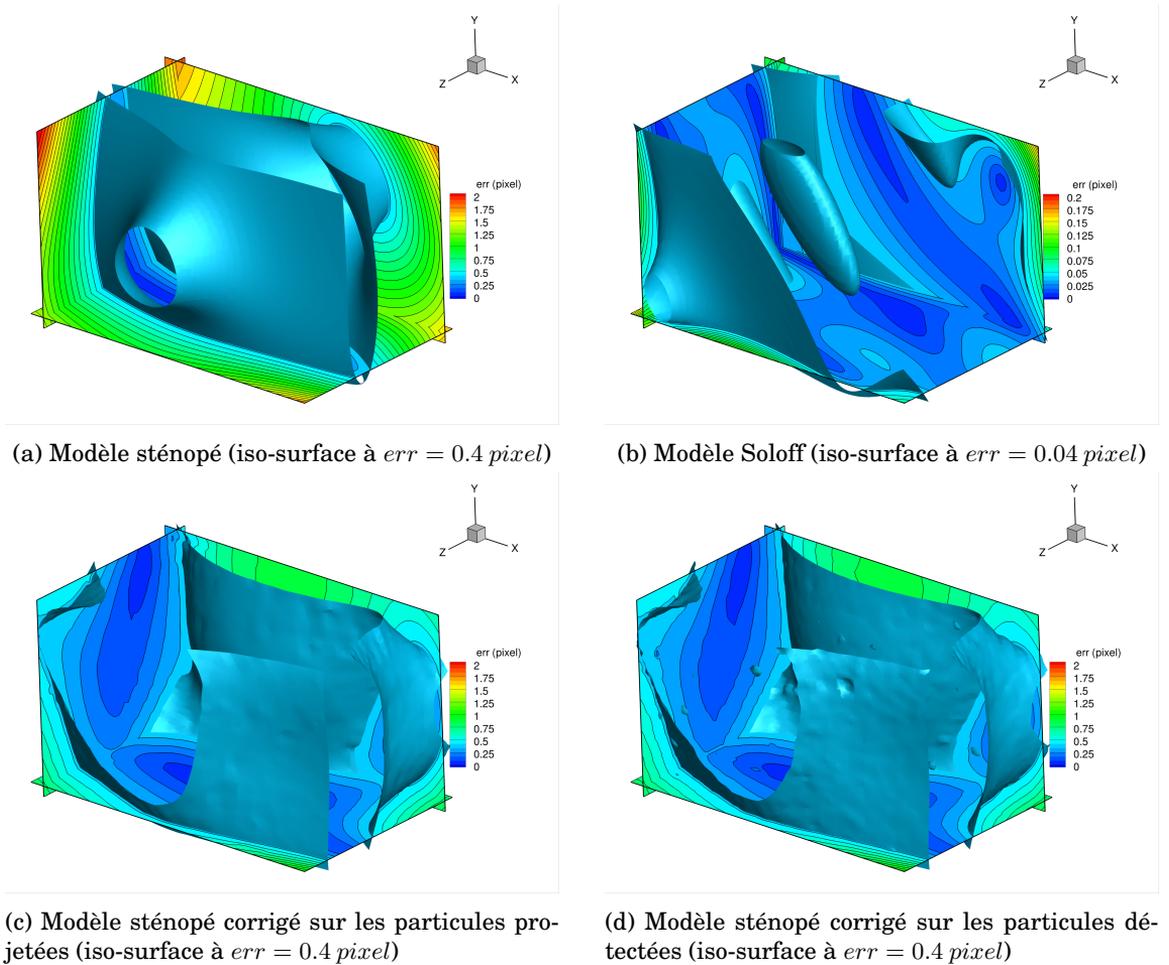


Figure 4: Erreur de projection des modèles de caméra

localisation est déterminée en calculant la distance entre la projection exacte et la projection du modèle évalué. Les résultats sont présentés sur la figure 4. Il faut noter que la légende pour le modèle Soloff est réduite d'un facteur 10. A cause de la réfraction aux interfaces, l'erreur de projection du modèle sténopé est importante avec des valeurs allant jusqu'à 2 pixels . La correction discrète réduit cette erreur à 1 pixel mais conserve le même ordre de grandeur. Le modèle Soloff, en revanche, tire avantage de son ordre plus élevé et maintient l'erreur de projection inférieure à 0.2 pixel .

Cependant, en ce qui concerne la qualité de triangulation (figure 5), le modèle corrigé présente de bien meilleures performances que les autres modèles. L'erreur de triangulation présentée ici est une erreur moyenne de reprojction calculée dans un petit volume tridimensionnel centré sur le point étudié. L'erreur du modèle sténopé atteint 1.2 pixel , et celle du modèle Soloff 0.12 pixel , ce qui est cohérent avec leurs erreurs de localisation précédemment calculées. On remarque qu'il y a un ordre de grandeur de différence entre les erreurs des deux modèles analytiques. Le modèle corrigé, quant à lui, présente des erreurs un ordre de grandeur inférieur à celle du modèle Soloff, avec des erreurs toujours inférieures à 0.01 pixel . Ce résultat est atteint pour le modèle calculé sur les particules projetées et sur les particules détectées. La faible différence entre les deux modèles corrigés, indique que l'erreur sur la détection est rapidement gommée par le calcul statistique de la correction.

Le modèle corrigé se révèle extrêmement performant pour faire intersecter les lignes de vue mais manque de précision en ce qui concerne la localisation des particules. Ce comportement est dû au fait que le modèle est calculé à l'aide des listes de particules triangulées, qui sont localisée à la position tridimensionnelle la plus probable, qui n'est pas forcément la position réelle. Par conséquent, la correction

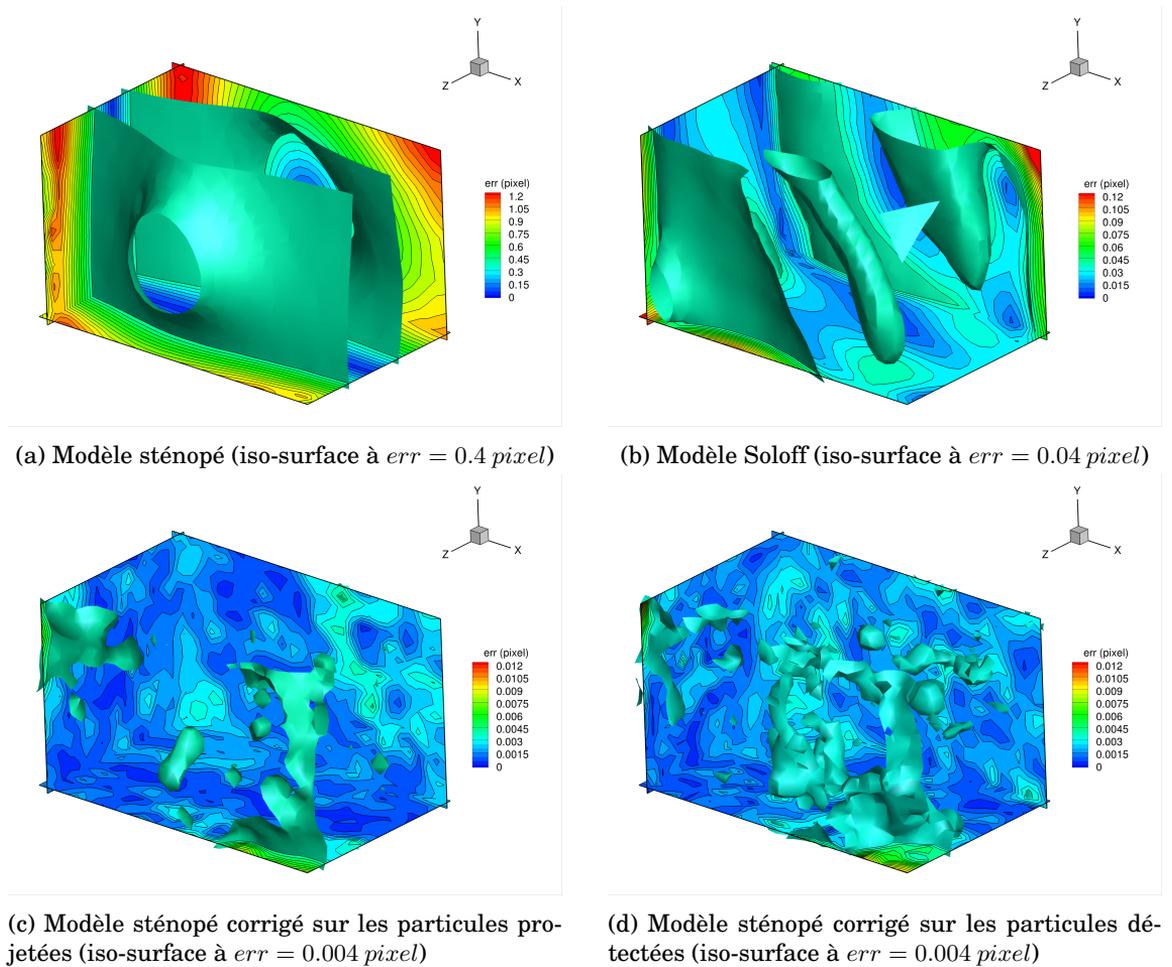


Figure 5: Erreur de triangulation des modèles de caméra

discrète est dans l'incapacité de corriger parfaitement la localisation sans à-priori sur le positionnement réel des particules, particulièrement lorsque le modèle analytique support est loin de la solution. De plus, la différence de performance en localisation est accrue par le fait que le modèle Soloff a été calculé sur les particules générées. En effet, en conditions expérimentales réelles, la procédure de correction de calibration du modèle Soloff introduirait le même type de biais.

5 Cas Expérimental

Le modèle de caméra corrigé a également été évalué sur des données expérimentales pour s'assurer de son bon fonctionnement en conditions réelles. Le montage est présenté en figure 6d. Il est composé d'une aile flexible NACA0015, moulée en polyuréthane ensemencé de particules PIV et immergée dans un aquarium. Un ensemble de quatre caméras est installé pour réaliser une reconstruction tomographique des particules dans le fluide et dans le profil. Comme la configuration est statique, l'illumination de la zone de mesure est générée par un système à balayage permettant de réaliser à la fois de la tomographie par balayage avec des temps d'ouverture caméra courts et de la tomographie PIV standard avec des temps d'ouverture longs. La configuration permet d'évaluer l'apport du nouveau modèle dans des conditions de profondeur de champ élevée (supérieure à 100 mm) et dans un contexte où un milieu d'indice optique différent de l'eau est présent (le profil d'aile). Dans le présent article, seule la première configuration est étudiée.

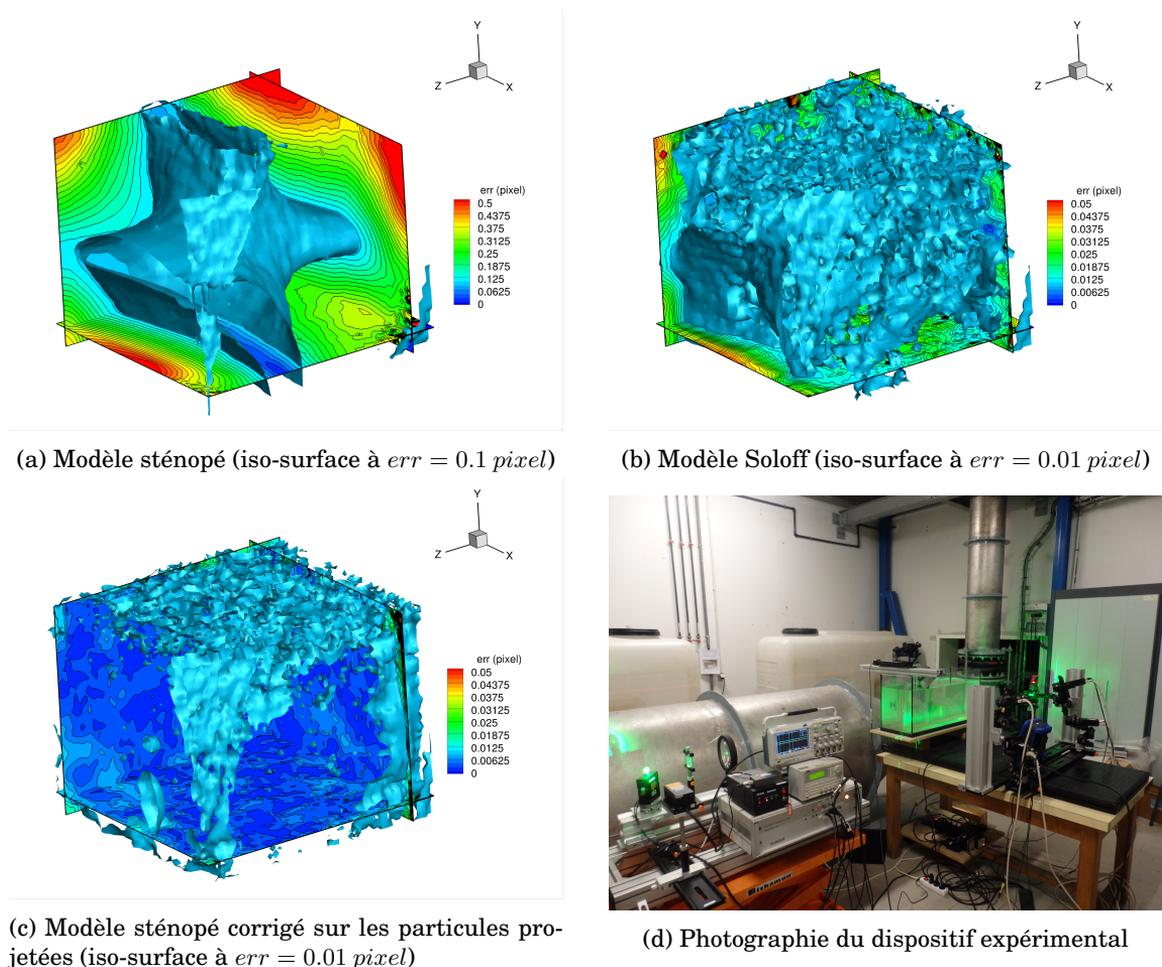


Figure 6: Erreur de triangulation expérimentale des modèles de caméra

Dans le cas expérimental, la position réelle des particules est inconnue; les modèles sont donc évalués uniquement sur leur performance en triangulation (figure 6). Le lecteur notera que les échelles ont été ajustées pour chaque modèle afin de visualiser correctement les répartitions d'erreur. De nouveau, le modèle sténopé présente des erreurs élevées (jusqu'à 0.6 pixel) tandis que le modèle Soloff a des erreurs un ordre de grandeur en dessous. Le modèle de caméra avec correction produit des erreurs encore inférieures. Les iso-surfaces ont été tracées à 0.01 pixel pour le modèle Soloff et le modèle corrigé. Le modèle polynomial présente des erreurs de l'ordre de $0.02 - 0.03 \text{ pixel}$ au cœur du volume, tandis que pour le modèle corrigé, les erreurs supérieures à 0.01 pixel sont cantonnées aux bords du volume et les erreurs au cœur du volume sont inférieures à 0.008 pixel .

En conséquence, le modèle corrigé apporte une qualité de triangulation satisfaisante là où d'autres modèles analytiques n'y parviennent pas. La correction réussit à réduire drastiquement l'erreur de triangulation en la ramenant d'une valeur de 0.6 pixel à une valeur inférieure à 0.01 pixel .

6 Conclusion et perspectives

Ce nouveau modèle de caméra associant un modèle sténopé avec une correction locale discrète a été mis en œuvre avec succès pour améliorer la reconstruction tomographique pour un cas numérique et expérimental. Il permet d'appréhender des problèmes avec des parois à géométrie complexe, générant des déformations optiques importantes. En effet, l'erreur de triangulation a été réduite à une valeur

inférieure à 0.01 *pixel* à l'intérieur du volume. Dans les cas expérimentaux, la correction d'alignement des caméra est une étape incontournable. Des analyses complémentaires sont donc requises pour déterminer si l'erreur de localisation du modèle corrigé est comparable à celle de modèles d'ordre élevé lorsque le processus de correction d'alignement est employé. L'association d'un modèle d'ordre élevé avec la correction discrète peut être implémentée afin de tirer parti à la fois des avantages d'un modèle analytique plus fidèle pour la localisation et des avantages de la correction qui apporte une qualité de triangulation accrue.

La correction de calibration dans l'expérience présentée est constante. Elle peut cependant être calculée à chaque n-uplet d'images lorsque des vibrations perturbent l'acquisition, à la manière de [8]. La méthode proposée apporte de nouvelles perspectives pour l'étude des interactions fluide-structure car elle permet de calibrer le modèle de caméra dans un solide transparent d'indice de réfraction différent de celui du milieu dans lequel il est immergé.

Remerciements

Les travaux de thèse de G. Acher sont financés par la Direction Générale de L'Armement et le travail présenté est supporté par le CPER FEDER de la Region Nouvelle Aquitaine.

References

- [1] F. Scarano. Tomographic piv: principles and practice. *Measurement Science and Technology*, 24(1):012001, 2012.
- [2] L. Thomas, B. Tremblais, and L. David. Optimization of the volume reconstruction for classical tomo-piv algorithms (mart, bimart and smart): synthetic and experimental studies. *Measurement Science and Technology*, 25(3):035303, 2014.
- [3] B. Wieneke. Volume self-calibration for 3d particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*, 45(4):549–556, 2008.
- [4] T.A. Earl, H.P. Dang, G. Lalizel, E. Dornnac, P. Braud, and L. Thomas. Tomographic piv measurements of an inclined heated jet in crossflow. *18th International Symposium on the Application of Laser and Imaging Techniques to Fluid Mechanics, LISBON, PORTUGAL*, 2016.
- [5] B. Lecordier, C. Gobin, C. Lacour, A. Cessou, B. Tremblais, L. Thomas, and L. David. Tomographic piv study of lifted flames in turbulent axisymmetric jets of methane. *16th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal*, 2012.
- [6] P. Daher, C. Lacour, F. Lefebvre, A. Cessou, B. Tremblais, L. Thomas, L. David, and B. Lecordier. Novel ex-situ calibration procedure for tomographic piv in a confined environment: application to a single-cylinder optical engine. *12th International Symposium on Particle Image Velocimetry-ISPIV17, 19-21 juin, Busan, Korea*, 2017.
- [7] S.M. Soloff, R.J. Adrian, and Z.-C. Liu. Distortion compensation for generalized stereoscopic particle image velocimetry. *Measurement science and technology*, 8(12):1441, 1997.
- [8] T.A. Earl, S. Cochard, L. Thomas, B. Tremblais, and L. David. 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.