HAL
open science

Adaptation de la PIV tomographique aux écoulements confinés : cas d'un moteur à combustion interne

Petra Daher, Corine Lacour, Franck Lefebvre, Carole Gobin, Armelle Cessou, Benoit Tremblais, Lionel Thomas, Laurent David, Bertrand Lecordier

To cite this version:

Petra Daher, Corine Lacour, Franck Lefebvre, Carole Gobin, Armelle Cessou, et al.. Adaptation de la PIV tomographique aux écoulements confinés : cas d'un moteur à combustion interne. 16ème Congrès Francophone de Techniques Laser pour la mécanique des fluides, CNRS, CentraleSupélec, Université Paris Saclay, IRSN, Sep 2018, Dourdan, France. hal-02097656

HAL Id: hal-02097656

https://hal.science/hal-02097656v1

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.

Adaptation de la PIV tomographique aux écoulements confinés : cas d'un moteur à combustion interne

Petra DAHER[1], Corine LACOUR[1], Franck LEFEBVRE[1], Carole GOBIN[1], Armelle CESSOU[1], Benoit TREMBLAIS[2], Lionel THOMAS[3], Laurent DAVID[3] et Bertrand LECORDIER[1]

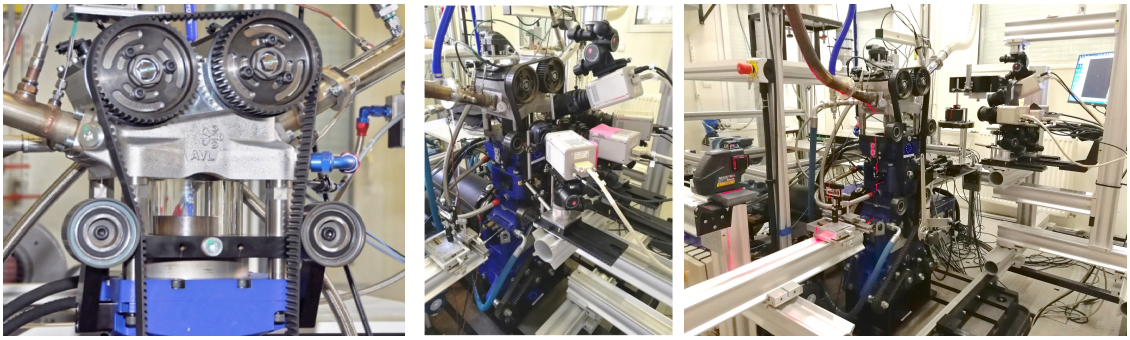
[1]Normandie Université, UNIROUEN, INSA Rouen, CNRS, CORIA, 76000 Rouen, France
[2] SIC - XLIM, Université de Poitiers, France
[3]Institut PPRIME, CNRS, Université de Poitiers, ENSMA, France

Email auteur correspondant : bertrand.lecordier@coria.fr

Dans ce travail nous avons appliqué la PIV tomographique sur un moteur transparent afin de capter le caractère 3D de l'écoulement aux différents instants du cycle d'admission et de compression. L'application de cette méthode optique dans une expérience présentant une géométrie confinée et un accès optique restreint a nécessité des adaptations et des optimisations particulières. Une technique de calibration 3D *ex-situ* originale réalisée en l'absence du confinement et corrigée par une mesure des déformations optiques dans le plan central $z0$ par le cylindre est présentée. Cette approche a été validée et comparée à celle classiquement utilisée. Après une optimisation des paramètres d'acquisition (densité en particule, épaisseur du volume...), nous présentons des premiers résultats de mesure 3D obtenus à plusieurs angles vilebrequin du cycle moteur.

1 Introduction

Le comportement de l'écoulement pendant les phases d'admission et de compression dans le cylindre d'un moteur à combustion interne influence fortement le processus du mélange air carburant et par la suite l'efficacité de combustion [1, 2]. Les différentes échelles des structures doivent être quantifiées et analysées afin d'établir une meilleure compréhension des phénomènes physiques fortement instationnaires se déroulant dans la chambre de combustion du moteur. Cela est possible aujourd'hui avec la disponibilité simultanée des moteurs optiques transparents et d'une large gamme de diagnostics lasers. En particulier, l'application de la PIV tomographique (TPIV) qui permet l'obtention des 3 composantes de vitesse instantanée dans un domaine volumique continu s'avère être indispensable pour accéder à la nature tridimensionnelle de l'écoulement [3, 4, 5]. Cependant, cette technique de mesure nécessite une grande liberté d'accès optique puisqu'elle implique plusieurs caméras visualisant le volume sous différents angles. Ceci complexifie son application dans les moteurs où la chambre de combustion a une géométrie confinée et un accès optique restreint. Une des premières difficultés réside dans le confinement de la chambre qui rend le processus de calibration 3D complexe vis-à-vis du déplacement d'une mire de calibration dans le volume d'investigation [6]. Une seconde difficulté est liée à la courbure et l'épaisseur du cylindre transparent qui induisent sur les systèmes d'imagerie de fortes déformations et aberrations optiques inhabituelles pour les méthodes de TPIV [7]. Pour surmonter les contraintes géométriques et assurer la précision des traitements de données, une technique de calibration *ex-situ* originale a été développée. Elle consiste à effectuer une calibration 3D en l'absence du confinement en parallèle d'une mesure des déformations optiques introduites dans le plan central $z0$ par le cylindre. La combinaison de ces deux données permet d'obtenir des nouveaux modèles de caméra tenant compte des déformations. Dans une dernière étape, ces modèles sont raffinés par une procédure de « *self-calibration* » [8]. Ainsi, la technique *ex-situ* est adaptable à toute géométrie faisant face aux problématiques de confinement et d'accès optique restreint. Afin de valider cette technique, les résultats moteur sont comparés aux reconstructions volumiques obtenues à partir de la calibration *in-situ* habituellement effectuée en TPIV. Pour conclure ce papier, des premiers résultats de mesure 3D dans le moteur sont présentés.



(a) Vue du moteur transparent (b) Position d'acquisition (c) Calibration in-situ

Figure 1: Présentation du banc moteur et de l'implantation du système d'acquisition d'image

2 Dispositif expérimental et reconstruction 3D

2.1 Montage expérimental

Dans cette étude, des mesures TPIV sont effectuées dans un moteur essence à injection directe, équipé d'un cylindre transparent de $82\ mm$ de diamètre et de $86\ mm$ de haut. Le moteur fonctionne à des vitesses de $2000\ tr/min$ en mode entraîné, c.-à-d. sans combustion. Le système d'acquisition est constitué de 4 caméras Hamamatsu (C9300 - 4M pixels) et d'un laser Spectra-Physics $10\ Hz$ assurant des doubles impulsions de 380 mJ à $532\ nm$. L'ensemble est synchronisé à l'aide d'une carte programmable permettant l'acquisition en phase avec les angles moteurs tout en assurant une fréquence de fonctionnement optimale du laser. Les caméras sont équipées d'objectifs PC-E Micro Nikkor ($45\ mm\ f/D2.8$) avec correction Scheimpflug et sont agencées dans une configuration pyramidale (figure 1). Ce choix diffère d'études précédentes [5] sur ce type de configuration et il permet de conserver des angles de vue distincts malgré un accès optique fortement contraint par la géométrie du moteur (figure 1(a)). Le volume de mesure, positionné au centre de la chambre de combustion, est formé à l'aide d'un ensemble de lentilles convergente et divergente et un miroir à 45° situé sous le piston transparent. Ce volume a une dimension de $52.53.\Delta Z mm^3$ où $\Delta Z = 3, 5, 8$ mm (cas $L3$, $L5$ et $L8$) centré sur le plan de symétrie z_0 de la chambre. L'épaisseur du volume est ajustée grâce à des couteaux fixés sur des translations micrométriques devant le miroir de renvoi. Sa largeur est également limitée par deux couteaux afin d'éviter les fortes réflexions lumineuses induites par la géométrie du cylindre transparent. Pour les mesures TPIV, l'écoulement est ensemencé avec des particules de DEHS de 1µm de diamètre moyen dont la densité peut être ajustée.

2.2 Reconstruction des champs 3D

Les volumes de particules sont reconstruits à partir des images pré-traitées des 4 caméras (correction du fond, normalisation locale...) à l'aide de l'algorithme SMART avec initialisation MinLOS. Pour la prise en compte des déformations optiques, nous avons retenu un modèle de caméra de type Soloff dont l'établissement des paramètres sera discuté dans la suite de l'article. Le code utilisé est celui développé par l'institut Prime [9]. Deux itérations avec la méthode d'interaction *raytracing*, un paramètre de relaxation variable et un seuil de filtrage de volume de $0,001$ sont employés. Sur l'ensemble des mesures, la qualité de re-projection est supérieure à 80% pour une dimension de volume de $52.52.\Delta Z mm^3$. Les champs de vitesse sont ensuite calculés à partir des paires de volume par une corrélation croisée 3D normalisée avec une interpolation *sub-pixel* et une méthode d'interpolation d'image de type de *spline* d'ordre 3. Dans le processus itératif de calcul, la passe finale s'effectue avec des fenêtres d'interrogation de $20.20.20$ pixel ($0.83^3 mm^3$) et un recouvrement de 75%. Le résultat est obtenu sur une grille de $50.50.k$ vecteurs, où $k = 12$ et 32 pour $\Delta Z = 3$ et $8mm$ respectivement. Sur l'ensemble des mesures, nous avons appliqué une procédure de validation donnant un taux de vecteur valide toujours supérieur à 80%.

3 Calibration

3.1 Introduction

La précision d'évaluation des paramètres du modèle des caméras (pinhole, Soloff, polynomiale...) est cruciale dans l'approche de PIV3D et plus critique que pour la PIV stéréoscopique. Elle consiste à déplacer dans le volume de mesure un objet calibré géométriquement (mire de point, papier millimétré...) et d'en extraire les caractéristiques sur chacune des images des caméras afin de déterminer les paramètres du modèle. Pour le raffinement final des caractéristiques des modèles, cette étape est généralement suivie par une procédure de « *self-calibration* » réalisée sur des images de particule de très faible concentration [8]. Cette approche, bien adaptée aux configurations ouvertes et de grande dimension, est souvent difficile à appliquer lorsque l'écoulement est confiné et que les dimensions de l'expérience se réduisent. Dans ce travail, nous proposons une approche de calibration 3D originale *ex-situ* qui associe le déplacement d'une mire en absence de confinement à une transformation géométrique évaluée uniquement dans le plan central du volume et permettant le passage d'une imagerie avec confinement vers une sans confinement. La combinaison de ces deux données permet d'obtenir des modèles 3D pour les caméras, qui tiennent compte des déformations optiques introduites par la présence du confinement.

3.2 Principe de la calibration 3D *ex-situ*

L'ensemble de la procédure de calibration *ex-situ* est présentée sur la Figure 2. La première étape consiste à réaliser une calibration 3D classique sans confinement en déplaçant une mire étalon sur l'intégralité du volume de mesure. A partir de ces enregistrements, les paramètres initiaux des modèles de camera sont évalués (modèle M_w). Dans une deuxième étape, le confinement est remis en place pour l'enregistrement du plan central z_0 du volume de mesure avec la même mire d'étalonnage (un plan fixe comme en PIV 2D2C). A partir des coordonnées des points d'étalonnage enregistrés à la position z_0 avec (X_{Cyl_Px}, Y_{Cyl_Px}) et sans confinement (X_{Px}, Y_{Px}), des polynômes de type $X_{Cyl_Px} = f(X_{Px}, Y_{Px})), Y_{Cyl_Px} = g(X_{Px}, Y_{Px})$ pour le passage d'un espace à l'autre sont établis. La dernières étape consiste à corriger les paramètres du modèle initial M_w à l'aide d'une « *self-calibration* ». Pour cela, des images de particules à faible concentration enregistrées avec le confinement sont projetées dans l'espace du modèle M_w sans confinement avant de réaliser la correction. Nous obtenons ainsi les paramètres du modèle final $M_{w_corrected}$ de chacune des cameras, utilisés pour la reconstruction volumique à partir des images de particules préalablement projetées dans l'espace sans confinement. Dans notre cas, en plus de s'affranchir des problèmes de désalignement classique, la « *self-calibration* » permet de corriger les erreurs en z induites par la correction des déformations évaluées uniquement dans le plan z_0 et qui peuvent varier suivant z.

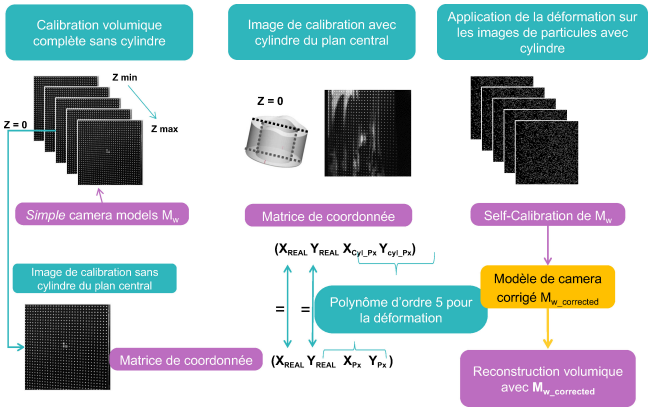


Figure 2: Procédure de calibration ex-situ

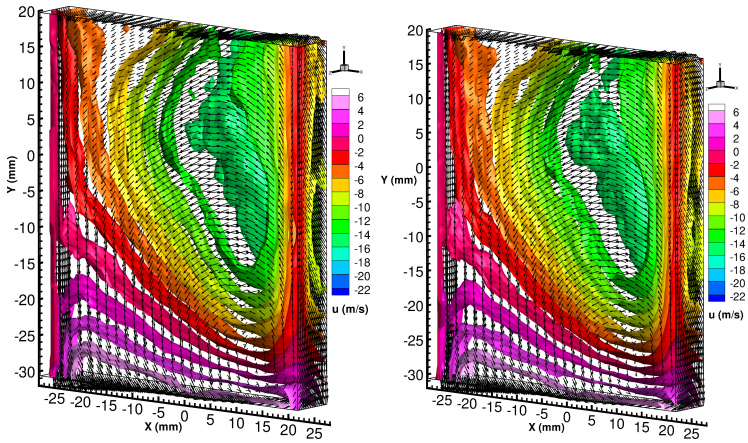
Le principal avantage de notre approche *ex-situ* est bien évidemment de pouvoir s'affranchir du confinement. Dans les cas de forte distorsion optique, elle permet également de réaliser une première correction des déformations, même d'ordre élevé, que les modèles de caméra ne peuvent pas facilement prendre en compte sans conséquence significative sur le temps de calcul de la reconstruction.

3.3 Comparaison des méthodes de calibration

Afin de valider et d'évaluer la précision de notre nouvelle méthode de calibration, nous avons réalisé en parallèle de la procédure *ex-situ*, une calibration classique en présence du cylindre. Cette dernière est le cas de référence que nous désignerons par calibration *in-situ*. Cette calibration, difficile à réaliser

en configuration d'acquisition avec cylindre, est obtenue en décalant l'ensemble du système d'acquisition sur le coté droit du banc moteur à l'aide d'un chariot mobile monté sur des glissières à billes évitant toute vibration des caméras (figure 1(b)). En face des caméras est alors repositionné très précisément à l'aide d'un laser d'alignement, un cylindre transparent dans la même position relative que dans la configuration d'acquisition (figure 1(c)). Dans cette configuration, il est possible de réaliser l'enregistrement des différents plans. Une fois les images des deux calibrations enregistrées sur 21 plans espacés de 0,5 mm, la position des points sur les images de mire est extraite automatiquement avec une précision *sub-pixel* par corrélation $2D$ d'un motif. Un modèle de Soloff pour chacune des quatre caméras est ensuite évalué avant d'effectuer un raffinage par une dernière étape de « *self-calibration* » [8] à l'aide de 250 images de particule enregistrées à très faible densité.

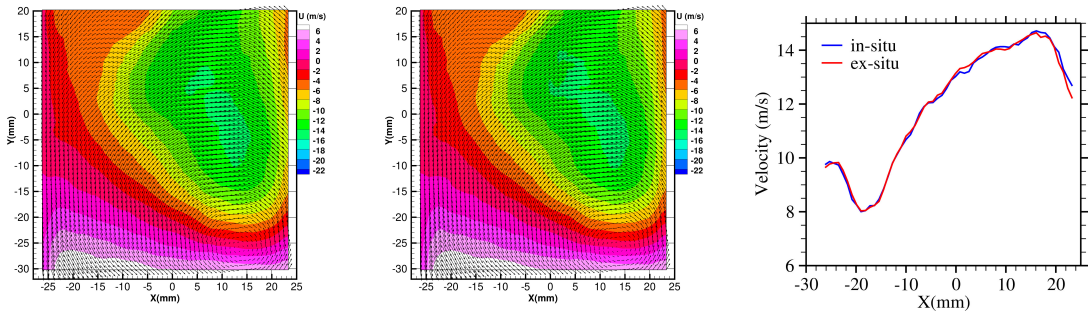
La première comparaison des deux modèles a été effectuée sur les champs moyens obtenus à partir de la même série de 250 acquisitions enregistrées au PMB[1] à 2000 tr/min (cas $L8$). Ces résultats présentés sur la figure 3 montrent le champ de vitesse 3D ainsi que des iso-surfaces de la composante u pour les deux calibrations. Dans cette représentation, nous ne constatons pas la moindre divergence entre les deux approches tant dans l'amplitude des vitesses que dans le positionnement de la structure tourbillonnaire présente à cet instant du cycle moteur [10]. Pour essayer de distinguer plus précisément la différence éventuelle entre les méthodes, sur la figure 4 nous présentons une coupe du volume de la figure 3 dans le plan $z = 0$ mm (*in-situ* : figure 4(a) - *ex-situ* : figure 4(b)) ainsi que les profils de vitesse en $y = -5\ mm$ (figure 4(c)). Comme dans la représentation 3D de la figure 3, nous ne constatons pas de différence notable entre les deux approches. Cela confirme donc que notre méthode



(a) Calibration *in-situ* (b) Calibration *ex-situ*

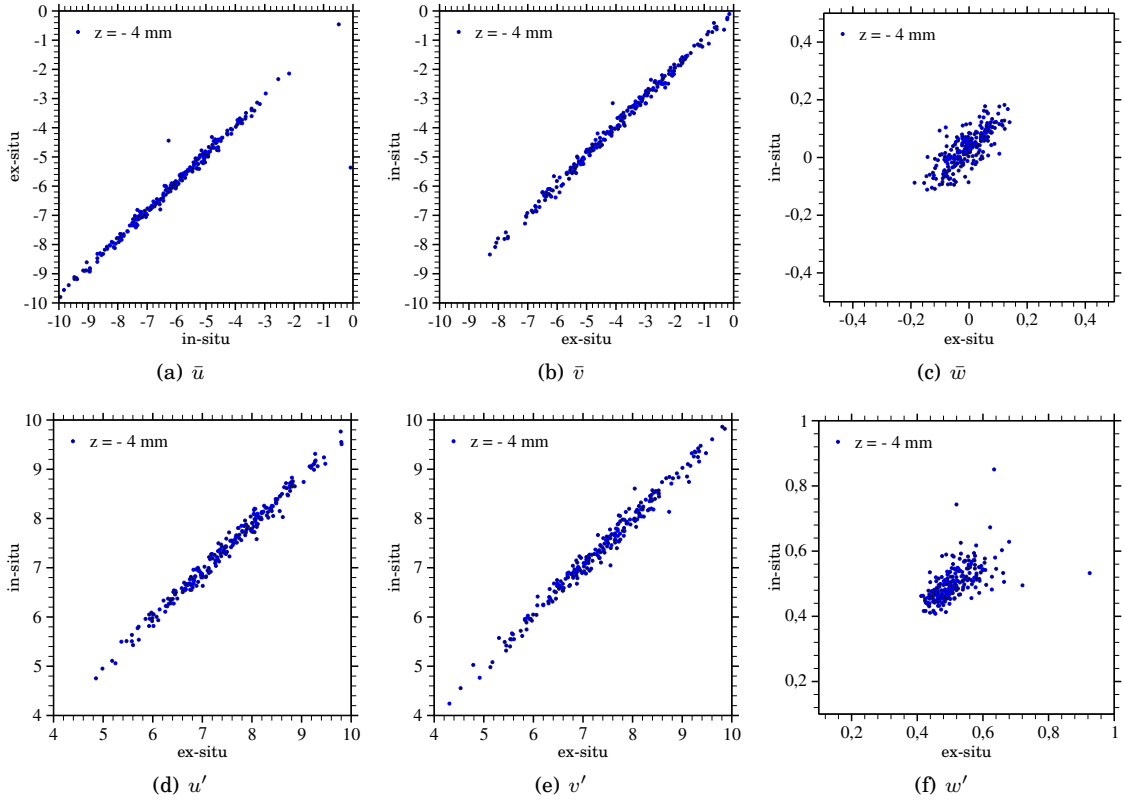
Figure 3: Comparison du champ moyen enregistré à 2000 rpm au PMB pour les calibrations *in-situ* et *ex-situ*

[1]Point Mort Bas



(a) Calibration *in-situ* (b) Calibration *ex-situ* (c) Comparaison profil

Figure 4: Coupe dans le plan z_0 pour les deux calibrations des champs de vitesse 3D de la figure 3 et profils des vitesses en $y = -5\ mm$



(a) $\bar{u}$ (b) $\bar{v}$ (c) $\bar{w}$

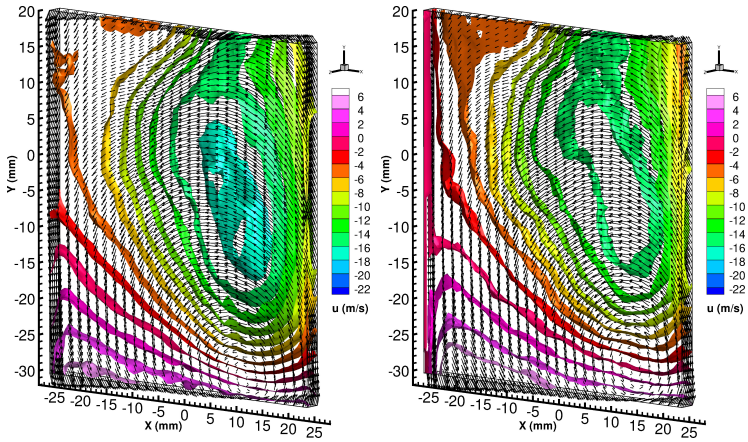
(d) u' (e) v' (f) w'

Figure 5: Corrélation entre les deux méthodes de corrélation des trois composantes de la vitesse moyenne (a, b, c) et fluctuante (d ,e, f) mesurées le plan $z = -4$ mm (cas $L8$)

ex-situ donne des résultats comparables en moyenne à ceux des techniques classiques.

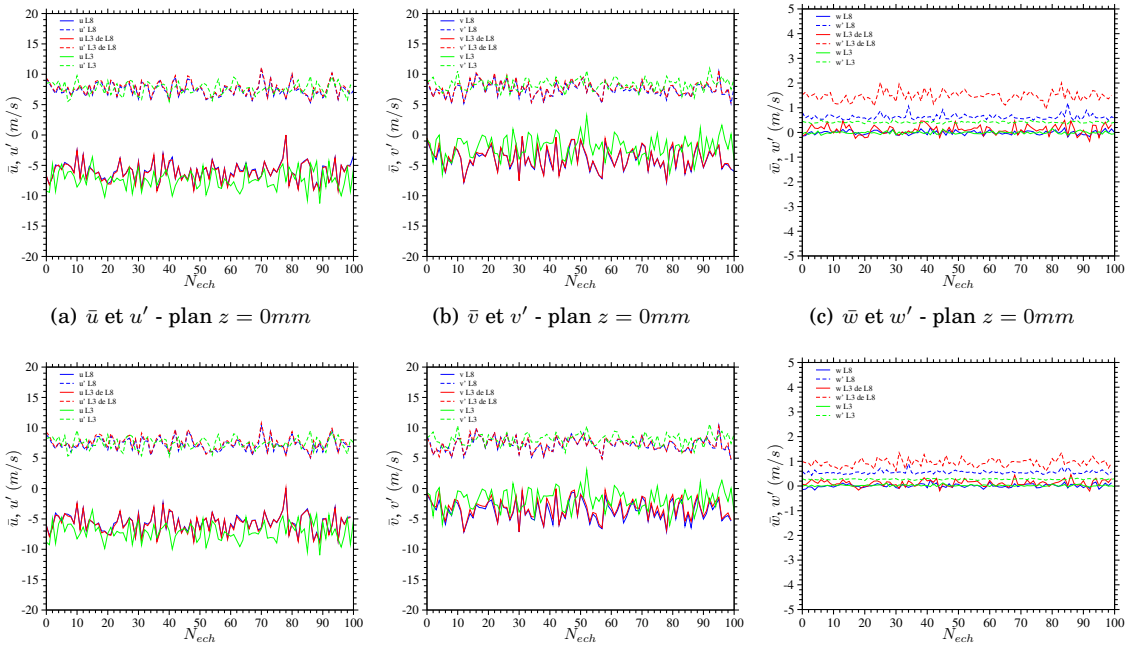
Afin d'aller plus loin dans la comparaison, sur la figure 5 nous présentons les corrélations des vitesses moyennes (haut) et les fluctuations (bas) entre les deux méthodes de calibration dans le plan le plus externe du volume ($z = -4mm$). Pour les composantes u et v nous obtenons une très bonne corrélation sur les 250 champs enregistrés. Pour la composante w, la comparaison est plus délicate compte tenu de la faible amplitude des vitesses dans le plan de symétrie des soupapes. Il reste néanmoins clairement observable une corrélation entre les résultats des deux méthodes de calibration.

A la vue de ces différents résultats, nous pouvons en déduire une similitude parfaite entre les



(a) Cas ($L3$) (b) Cas ($L8$)

Figure 6: Comparaison du champ de vitesse moyen pour une reconstruction sur 3 mm des cas $L3$ et $L8$



(a) $\bar{u}$ et u' - plan $z = 0mm$ (b) $\bar{v}$ et v' - plan $z = 0mm$ (c) $\bar{w}$ et w' - plan $z = 0mm$

(d) $\bar{u}$ et u' - plan $z = 1,5mm$ (e) $\bar{v}$ et v' - plan $z = 1,5mm$ (f) $\bar{w}$ et w' - plan $z = 1,5mm$

Figure 7: Comparaison des statistiques de vitesse dans le plan $z = 0$ et $z = 1,5mm$ pour une nappe d'épaisseur 3 mm ($L3$) et la reconstruction sur 3 mm de l'enregistrement à 8 mm ($L8$)

deux approches de calibration et ainsi valider notre méthode *ex-situ*.

4 Optimisation de l'épaisseur de nappe

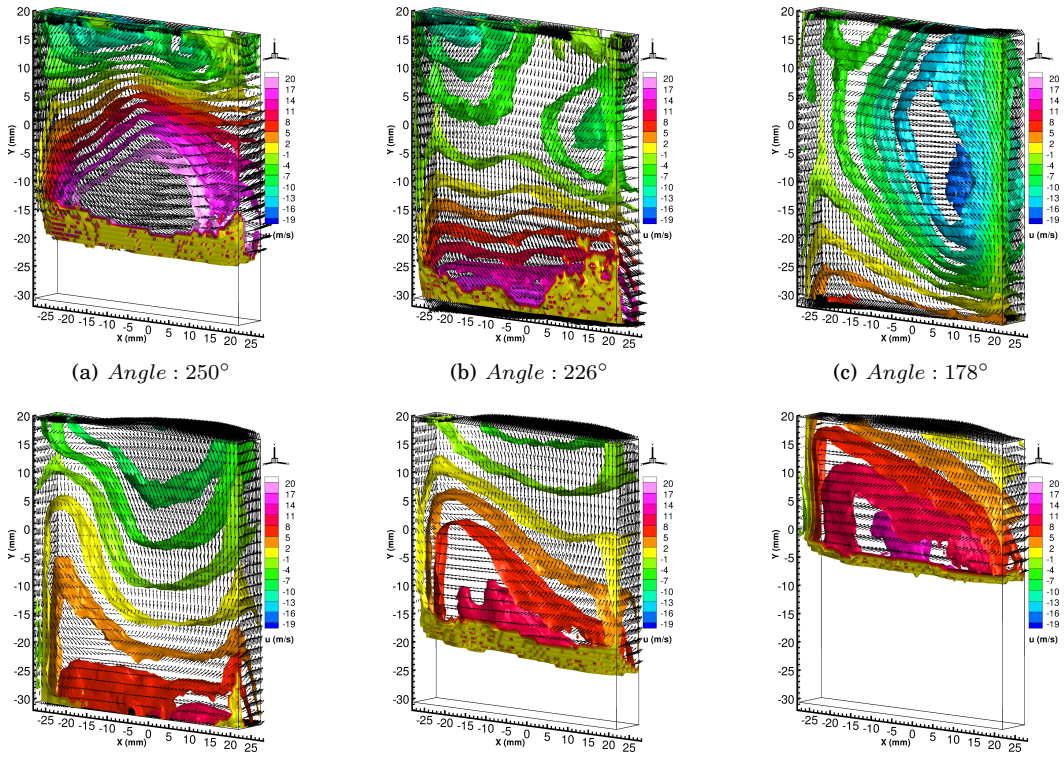
Un des paramètres importants dans les mesures de vitesse 3D est l'épaisseur du volume d'analyse. Dans la majorité des cas, il est délimité par le volume éclairé dans l'écoulement. La nécessité de conserver des concentrations en particule inférieures à 0.1 *particule par pixel (ppp)* sur les images pour une reconstruction de bonne qualité, impose une relation directe entre l'épaisseur de l'éclairement et la concentration des particules introduites dans le fluide. Dans notre expérience, l'augmentation des phénomènes de distorsion pour les zones les plus éloignées du plan central de mise au point peut également limiter la dimension du volume pour la reconstruction. Afin d'étendre au maximum l'épaisseur de la zone d'analyse sans réduire de façon significative la qualité et la précision du champ de vitesse, nous avons acquis et comparé des enregistrements en faisant varier l'épaisseur de nappe (3, 5 et 8 mm) tout en ajustant la concentration en particule d'ensemencement pour maintenir le même taux de *ppp* sur les images. Nous n'avons pas considéré d'épaisseur supérieure car cela nécessitait de réaliser à l'aide d'une optique adaptée un élargissement trop important du faisceau laser pour conserver un profil de type « *top hat* » favorable à la reconstruction. La plus faible densité d'énergie dans le volume conduisait à une dégradation significative du rapport signal sur bruit sur les images.

La première comparaison a été effectuée sur les champs moyens en réalisant une reconstruction sur une épaisseur de $3\ mm$ pour le cas $L3$ et $L8$ (Figure 6). Pour ces deux cas extrêmes (cas $L5$ non présenté), nous pouvons constater une très grande similitude entre les deux résultats, le cas $L3$ étant pris comme situation de référence compte tenu de sa plus faible épaisseur et correspondant exactement à la dimension fixée lors de la reconstruction. Ce premier résultat montre donc que dans une zone commune de reconstruction, les mesures de vitesse sont très proches en moyenne et qu'une épaisseur de $8\ mm$ semble raisonnablement accessible pour notre étude. Pour compléter ce résultat, sur la Figure 7, nous avons tracé pour 100 cycles moteur, les statistiques $\bar{u}$, u', $\bar{v}$, v', $\bar{w}$ et w' dans les plans $z = 0$ et $z = -1.5\ mm$. Comme pour l'analyse précédente, nous avons reporté le cas $L3$ et $L8$ reconstruits sur $3\ mm$, et nous

lui avons adjoint le cas $L8$ reconstruit sur l'intégralité du domaine. L'acquisition des cas $L3$ et $L8$ étant réalisés à des instants différents, il n'est pas possible de comparer les résultats cycle-à-cycle. Pour cela, nous analyserons donc l'évolution des moyennes et des fluctuation ainsi que l'amplitude de leurs variations.

Pour les résultats obtenus dans le plan central des volumes (Figures 7(a), 7(b) et 7(c)), les valeurs moyennes des trois composantes ont des plages de variations identiques. Cela confirme la très bonne similitude des champs moyens observés sur la figure 6. Pour les fluctuations de vitesse u' (Figure 7(a)) et v' (Figure 7(b)) nous observons également des résultats très proches et aucune amplification ou atténuation des fluctuations du cas $L8$ qui pourraient traduire respectivement une augmentation du bruit ou un lissage des champs de vitesse par rapport au cas $L3$. En revanche pour la composante w, nous notons une légère augmentation de l'amplitude des fluctuations w' (Figure 7(c)) pour le cas $L8$ par rapport au cas $L3$. Pour $L8$ reconstruit sur l'intégralité du volume, la variation de w' peut s'expliquer par un calcul de w' sur un volume plus large prenant en compte une zone de l'écoulement plus éloignée du plan de symétrie dans le moteur. Pour le cas $L8$ reconstruit sur $3\ mm$, l'augmentation de w' est plus délicate à expliquer et nous pensons qu'elle est due à l'apparition de particule fantôme dans la reconstruction suite à la restriction de la reconstruction à $3\ mm$ alors que nous imageons des particules sur $8\ mm$. Ce phénomène n'était pas observable sur u' et v' car il reste de faible amplitude. Si nous regardons maintenant les résultats dans le plan $z = 1,5mm$ (Figures 7(d), 7(e) et 7(f)) en limite de la reconstruction, les mêmes constatations que dans le plan central peuvent être faites.

De cette analyse, nous pouvons conclure que dans notre expérience, l'utilisation d'une nappe de $8\ mm$ permet d'obtenir des résultats robustes sur l'intégralité du domaine sans entacher la qualité des résultats par rapport à un volume plus fin. Pour la suite de l'étude, nous adopterons donc cette épaisseur d'enregistrement.



(a) $Angle$: 250° (b) $Angle$: 226° (c) $Angle$: 178°

(d) $Angle$: 130° (e) $Angle$: 106° (f) $Angle$: 82°

Figure 8: Vitesses moyennes et iso-surfaces de u (cas $L8$, 2000 tr/min, $P_{ad} = 1$ bar) pendant la phase d'admission (250°, 226° et 178°) et le début de la compression (130°, 106° et 82°).

5 Résultats préliminaires

Sur la Figure 8, nous présentons pour un cas moteur à $2000\ tr/min$ pour une pression d'admission de $1\ bar$, une série de résultat moyen sur 250 champs pour 6 angles vilebrequin enregistrés pendant la phase d'admission et le début de la compression. Pendant la phase d'admission, nous observons la formation d'une grande structure tourbillonnaire (*tumble*) caractéristique de l'aérodynamique dans les moteurs essences à allumage commandé [5, 10]. Pour les deux derniers angles, nous notons une accélération de la rotation de la structure tourbillonnaire se produisant juste avant sa rupture vers les plus petites échelles de turbulence en fin de compression avant l'allumage. Pour ces 6 angles vilebrequin, ces résultats moyens sont en accord avec ceux obtenus par PIV basse fréquence et haute fréquence dans le plan central $z0$ dans les mêmes conditions [10]. Ce constat permet dans une première étape de valider les mesures 3D dans le moteur avant dans un second temps de réaliser des analyses plus poussées prenant en compte le caractère fortement 3D et instationnaire de l'aérodynamique. En effet, actuellement le potentiel des champs 3D instantanés n'a pas encore été exploité mais devrait à terme permettre d'évaluer l'importance du caractère 3D de l'écoulement dans l'apparition des variations cycle-à-cycle et plus particulièrement sur les variabilités de la position du centre de rotation et de l'énergie de la structure tourbillonnaire.

6 Conclusions et perspectives

Dans ce travail nous avons présenté une application de la technique de PIV tomographique dans le cas d'un moteur à allumage commandé afin d'analyser le caractère 3D de l'aérodynamique et les variations cycle-à-cycle. L'utilisation de cette méthode optique dans un milieu confiné avec des accès optiques contrains reste délicate, en particulier pour la phase de calibration. Nous avons donc proposé une nouvelle approche de calibration *ex-situ* qui consiste à effectuer une calibration 3D en l'absence du confinement en parallèle d'une mesure des déformations optiques introduites dans le plan central $z0$ du volume. Cette nouvelle approche a été comparée avec succès à celle classiquement utilisée et elle est applicable dans toutes les configurations où il est difficile de recourir à une mire de calibration mobile. Nous avons ensuite optimisé les paramètres d'acquisition et en particulier l'épaisseur du volume de mesure, qui dans notre cas a pu être établi à $8\ mm$. Les premiers résultats des champs moyens 3D ont été présentés pour plusieurs angles vilebrequins et ont montré tous les potentiels de la PIV tomographique pour étudier ce type d'écoulement complexe. Dans la suite de ce travail, nous devrons analyser les champs 3D instantanés pour essayer d'évaluer l'influence des instabilités des jets de soupape sur les variations cycle-à-cycle, données difficilement accessibles à partir de champ de vitesse 2D de type PIV 2D-2C ou 2D-3C.

Remerciements

Ce travail fait partie du projet ESSENCYELE (moteur ESSENCe injection directe hYbride Electrique abordabLE) financé par l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME).

References

[1] M. Buschbeck, N. Bittner, T. Halfmann, and S. Arndt. Dependence of combustion dynamics in a gasoline engine upon the in-cylinder flow field, determined by high-speed piv. *Experiments in fluids*, 53(6):1701–1712, 2012.

[2] Jacques Borée and Paul C. Miles. *In-cylinder Flow*, pages 1–31. American Cancer Society, 2014.

[3] G. E. Elsinga, F. Scarano, B. Wieneke, and B. W. van Oudheusden. Tomographic particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*, V41(6):933–947, December 2006.

[4] B. Peterson, E. Baum, C.-P. Ding, D. Michaelis, A. Dreizler, and B. Böhm. Assessment and application of tomographic piv for the spray-induced flow in an ic engine. *Proceedings of the Combustion Institute*, 36(3):3467 – 3475, 2017.

[5] E. Baum, B. Peterson, C. Surmann, D. Michaelis, B. Böhm, and A. Dreizler. Investigation of the 3d flow field in an ic engine using tomographic piv. *Proceedings of the Combustion Institute*, 34(2):2903 – 2910, 2013.

[6] Fabio J W A Martins, Jean-Marc Foucaut, Michel Stanislas, and Luis Azevedo. Tomo-piv of turbulent water flow in a square duct employing external calibration. In *The 12th International Symposium on Particle Image Velocimetry – ISPIV At: Busan, Korea*, 06 2017.

[7] Petra Daher, Corine Lacour, Franck Lefebre, A. Cessou, Benoit Tremblais, Lionel Thomas, Laurent David, and Bertrand Lecordier. Novel ex-situ calibration procedure for tomographic piv in a confined environment: Application to a single-cylinder optical engine. In *The 12th International Symposium on Particle Image Velocimetry – ISPIV At: Busan, Korea*, June 2017.

[8] B. Wieneke. Volume self-calibration for 3d particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*, 45(4):549–556, October 2008.

[9] 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.

[10] Petra Daher, Corine Lacour, Franck Lefebvre, Eric Domingues, A. Cessou, and Bertrand Lecordier. Etude des variabilités cycliques dans le cylindre d'un moteur essence à injection directe par la PIV haute cadence. In *Congrès Francophone de Techniques Laser, CFTL 2016*, Toulouse, France, September 2016.