



**HAL**  
open science

## Etude des variabilités cycliques dans le cylindre d'un moteur essence à injection directe par la PIV haute cadence

Petra Daher, Corine Lacour, Franck Lefebvre, Eric Domingues, A. Cessou, Bertrand Lecordier

### ► To cite this version:

Petra Daher, Corine Lacour, Franck Lefebvre, Eric Domingues, A. Cessou, et al.. Etude des variabilités cycliques dans le cylindre d'un moteur essence à injection directe par la PIV haute cadence. Congrès Francophone de Techniques Laser, CFTL 2016, Sep 2016, Toulouse, France. hal-01852238

**HAL Id: hal-01852238**

**<https://hal.science/hal-01852238>**

Submitted on 1 Aug 2018

**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.

# **Etude des variabilités cycliques dans le cylindre d'un moteur essence à injection directe par la PIV haute cadence**

**P. Daher, C. Lacour, F. Lefebvre, E. Domingues, A. Cessou and B. Lecordier**

CORIA UMR 6614 CNRS – Normandie Université, site Universitaire du Madrillet (BP12)  
F-076801 Sainte Etienne de Rouvray CEDEX.

## **Résumé**

Les résultats obtenus à partir des mesures expérimentales par PIV haute cadence dans la chambre de combustion d'un moteur essence à injection directe ont été analysés à l'aide de la décomposition propre orthogonale (POD) dans le but d'isoler les structures cohérentes au cours d'un cycle moteur et identifier leurs variabilités cycliques. Des investigations basées sur l'analyse de la position du centre du tumble en fonction de la phase moteur, i.e. à un degré vilebrequin déterminé, montrent que les plus fortes variations apparaissent lors de la compression. Il a été démontré que les dispersions aérodynamiques dans la chambre de combustion se comportent différemment en fonction de l'ouverture de la tubulure d'admission.

## **1. Introduction**

Le processus aérodynamique dans le cylindre d'un moteur à combustion interne subit des variations cycliques défavorables pour le fonctionnement du moteur puisqu'elles impliquent l'initiation de la combustion à partir des conditions différentes. Notamment, les instabilités des structures cohérentes qui contiennent essentiellement la majorité de l'énergie cinétique de l'écoulement [1] semblent être l'agent principal responsable des variations cycle-à-cycle (VCC) dans le cylindre. Cependant, les origines des VCC ne sont pas complètement connues mais leurs effets ont été démontrés dans plusieurs travaux de recherche [3] et se traduisent par une augmentation des émissions polluantes et une diminution de la performance du moteur. D'où la nécessité d'analyser plus profondément les causes des VCC afin d'atteindre une reproductibilité de la structure aérodynamique dans le cylindre du moteur et donc d'optimiser les conditions initiales de la combustion.

Dans ce contexte, un meilleur aperçu spatio-temporel de la dynamique de l'écoulement dans la chambre de combustion est nécessaire. Cela est désormais possible avec les développements récents des diagnostics laser dont l'application à des moteurs à combustion interne vise à mieux comprendre les phénomènes physiques complexes s'y déroulant. En particulier, la vélocimétrie par image de particules (PIV) a été employée durant les dernières décennies pour suivre les mouvements transitoires et multidimensionnels ayant lieu dans les moteurs avec un grand intérêt pour la génération des variations cycliques. De plus, les acquisitions à haute cadence réalisables aujourd'hui grâce aux avancements des caméras et

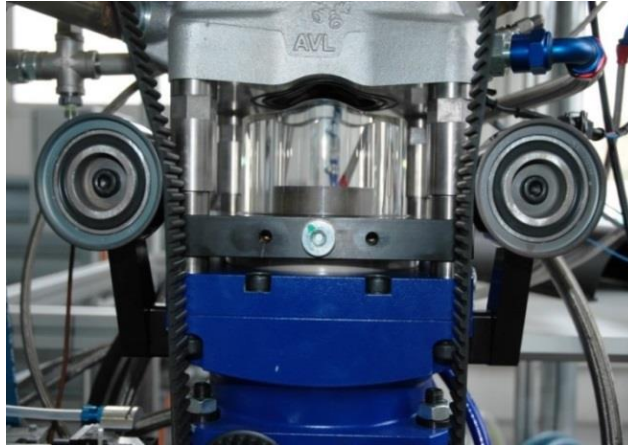


Figure 1. Chambre de combustion du moteur monocylindre optique

des capacités de stockage ouvrent les horizons vers une meilleure représentation résolue dans le temps permettant ainsi d'atteindre une meilleure compréhension des mécanismes fondamentaux de l'écoulement. Dans ce travail, la PIV haute cadence (HS-PIV) a été employée sur le banc moteur optique du laboratoire CORIA, décrit dans le §2, en considérant différents régimes de rotation (2000 tr/min et 3000 tr/min) sous différentes conditions d'admission (100%, 50% et 25% de l'ouverture totale du papillon d'admission). L'évolution de la structure aérodynamique le long des différentes phases du moteur a été étudiée pour les 6 cas de fonctionnement. Le traitement des données et l'analyse des résultats seront présentés au §3. Enfin, une conclusion des travaux effectués est donnée au §4.

## 2. Montage expérimental

Le banc moteur est un monocylindre 4 temps essence à injection directe développé par la société AVL (figure 1). Il a un taux de compression de 8.5 et une cylindrée de  $450 \text{ cm}^3$  avec une course du piston de 82 mm et un alésage de 86 mm. Il fonctionne en mode entraîné et en combustion jusqu'à des vitesses de rotation de 3000 tr/min et des pressions d'injection atteignant 200 bar. Une configuration optique permettant l'accès dans la chambre de combustion est assurée grâce à un cylindre transparent en silice. Ce moteur quatre soupapes est muni d'une bougie d'allumage centrale et d'un injecteur qui ont été maintenus inactifs durant les essais.

Pour la mise en place du dispositif HS-PIV (figure 2), un laser dual-darwin-80 est associé à une caméra haute fréquence de type Photron SAX 1. Ce laser à 2 cavités délivre une énergie de 25 mJ à 1 KHz/cavité. La nappe laser est formée dans le plan vertical entre les 2 soupapes d'admission. Le champ de vision de la caméra est de  $91 \times 91 \text{ mm}^2$  correspondant à une résolution d'image de  $768 \times 768$  pixels. En outre, l'écoulement est ensemencé avec des particules d'huile d'environ  $1 \mu\text{m}$  de diamètre qui suivent fidèlement sa dynamique. Ces particules sont introduites loin en amont des soupapes afin de ne pas perturber l'aérodynamique dans le cylindre. Une procédure d'optimisation de la qualité des images de particules visant à éliminer les fortes réflexions des bords du cylindre a été effectuée. Cela a entraîné la réduction des dimensions des champs de vitesse à  $74 \times 84 \text{ mm}^2$ . Une unité originale de synchronisation a été développée pour ajuster la durée  $\Delta t$  entre 2 pulses laser à chaque phase moteur. Suivant les conditions de l'écoulement instantané dans le cylindre, des  $\Delta t$  entre 10 et 20  $\mu\text{s}$  ont été attribués au cours d'un même cycle moteur. Une fréquence de 3 KHz de la caméra a été fixée pour toutes les acquisitions.

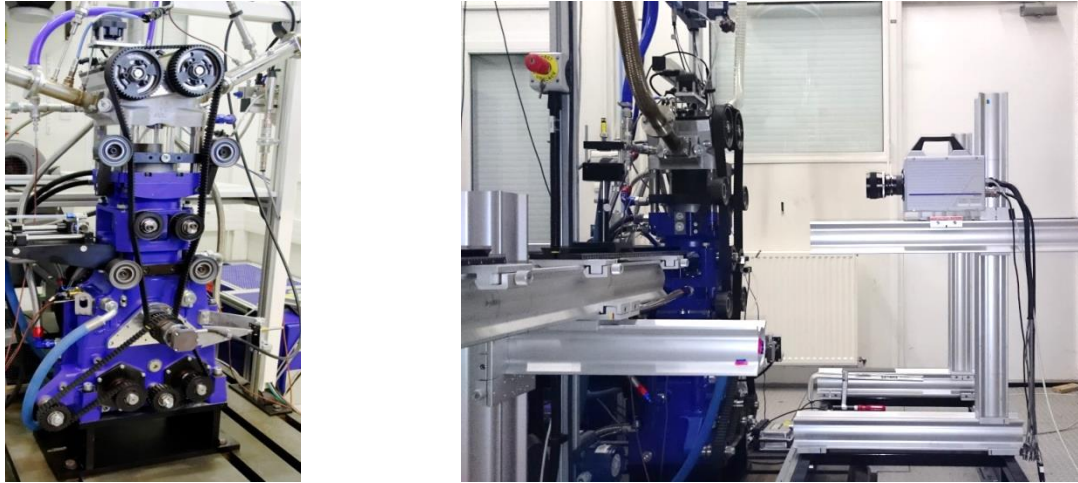


Figure 2. Banc moteur optique (a) Dispositif HS-PIV (b)

Dans une première étape vers la compréhension et la caractérisation des mécanismes conduisant à la formation des VCC, seule l'aérodynamique sans injection ni combustion a été analysée. On s'intéresse alors aux phases d'admission et de compression, i.e. la moitié de chaque cycle moteur. Dans cette étude, la référence 0 degré vilebrequin (DV) a été affectée au point mort haut (PMH) en début d'admission. Les campagnes d'acquisitions ont été effectuées pour 2 régimes de fonctionnement  $N = 2000$  tr/min et  $N = 3000$  tr/min représentatifs des vitesses réelles de rotation d'un moteur. Ainsi, les images de particules ont été enregistrées pour des séries de cycles moteurs successifs à des résolutions angulaires d'acquisition de 8 et de 12 DV respectivement, i.e. 90 et 60 couples d'images par cycle. Pour chaque cas, on considère 3 ouvertures de la tubulure d'admission, soient  $A=100\%$ ,  $B=50\%$  et  $C=25\%$  de sa dimension initiale. Ensuite, pour chacun des 6 cas de fonctionnement obtenus, 300 à 500 cycles sont enregistrés à partir des séquences successives d'acquisitions. Ces dernières ont été limitées à 50 et 80 cycles moteurs dû à la capacité de stockage de la caméra. Enfin, pour maintenir une qualité d'images optimisée, le cylindre est nettoyé toutes les 3 ou 4 séquences pour éliminer les dépôts de particules sur la paroi.

### 3. Traitement des données

#### 3.1 Traitement PIV

Le traitement PIV est réalisé à l'aide des programmes originaux mis au point au laboratoire CORIA. Une méthode itérative avec déformation d'image est effectuée sur des fenêtres d'interrogation allant de  $32 \times 32$  pixels à  $20 \times 20$  pixels ( $2.4 \times 2.4$  mm<sup>2</sup>). Le nombre d'itérations est obtenu dynamiquement à partir des caractéristiques (moyenne, fluctuation...) du champ vectoriel correcteur. Ce nombre varie entre 3 et 6 et les dimensions de la fenêtre d'interrogation sont localement réduites après le résultat de la validation du champ de vitesse obtenu. De plus, pour réduire l'influence des diffusions parasites et aboutir à des champs de vitesse plus fiables, une correction de fond par une image moyenne de particules est réalisée. Les frontières variables du domaine de mesure instantané par le mouvement de translation du piston sont gérées grâce à un algorithme de masque variable en fonction de la phase du moteur. Ce masque est utilisé dans le calcul des vitesses et dans le processus de déformation afin d'éviter la propagation des erreurs dans le processus itératif. Ces

adaptations associées à l'ajustement du  $\Delta t$  au cours du cycle en fonction des conditions aérodynamiques permettent d'obtenir plus de 95% de vecteurs validés.

### 3.2 Post-traitement des données

#### Analyse statistique

Le cycle moteur moyen a été calculé à partir des champs instantanés pour les différents modes de fonctionnement du moteur. Une description générale de l'écoulement est donnée grâce aux champs de vitesses moyennes présentés sur la figure 3 pour le mode B à 2000 tr/min. Une structure tourbillonnaire se forme en début d'admission dans la partie supérieure gauche de la chambre de combustion, sous les soupapes d'échappement. Au fur et à mesure du déroulement de l'admission, le tourbillon se déplace vers le centre de la chambre puis continue jusqu'au point mort bas (PMB) en allant vers la droite du plan de mesure. Durant la compression, le tourbillon persiste et son centre remonte vers le haut du cylindre à gauche du domaine de mesure, sous les soupapes d'échappement.

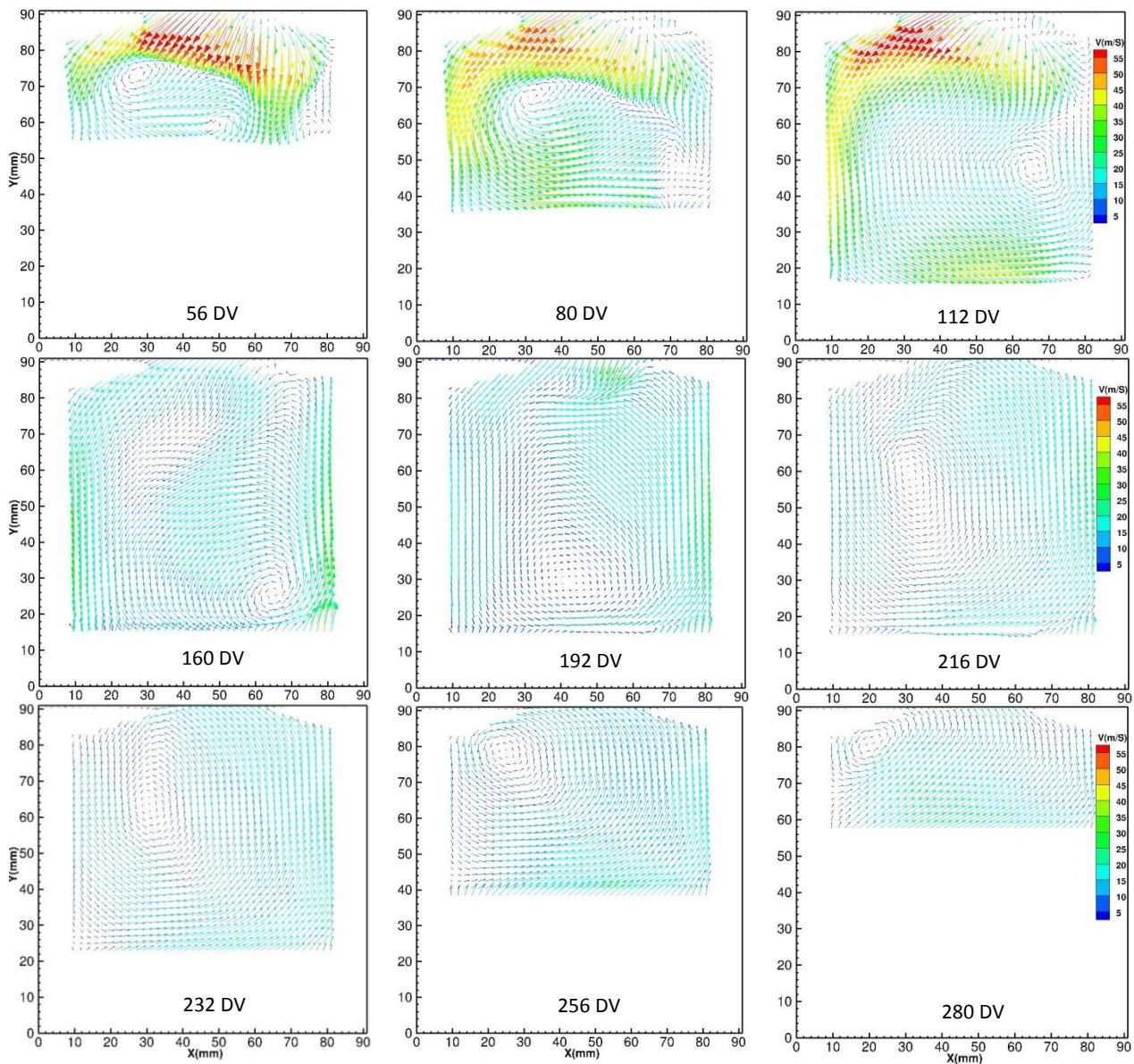


Figure 3. Cycle moteur moyen du mode B pour  $N = 2000$  tr/min

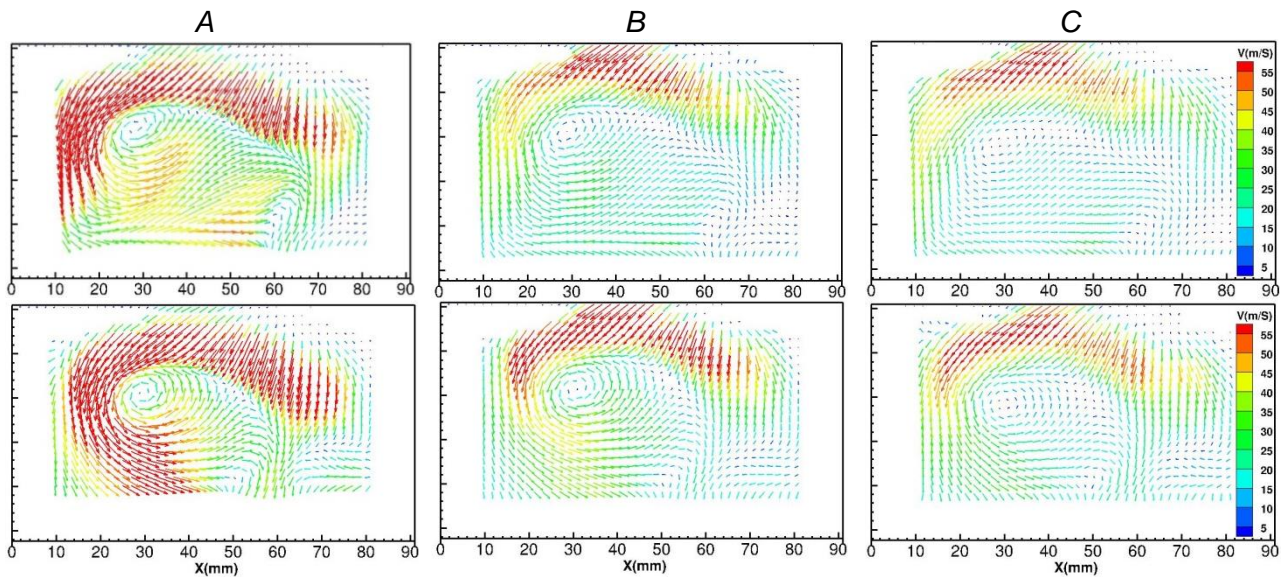


Figure 4. Vitesse moyenne d'admission pour A, B et C pour  $N=2000$  tr/min à 80 DV (en haut) et  $N=3000$  tr/min à 72 DV (en bas)

Une comparaison des différents cas de fonctionnement du moteur est présentée sur la figure 4. Une diminution des vitesses moyennes d'admission est observée lorsque l'ouverture de la tubulure d'admission est réduite. Cela peut être expliqué par la diminution du flux d'air rentrant par les soupapes sachant que la pression d'admission a été maintenue constante à 1 bar. D'autre part, l'écoulement instantané est beaucoup plus complexe à analyser car les champs de vitesses instantanées comportent différentes échelles de structures qu'il faut séparer afin de comprendre l'influence de chacune sur l'écoulement global. Plusieurs méthodes ont été employées à l'égard de cette séparation, parmi lesquelles nous choisissons la décomposition propre orthogonale (POD).

### Décomposition propre orthogonale

Les champs de vitesse instantanée ont ainsi été traités avec la snapshot POD [9] dans le but d'analyser l'évolution de la structure aérodynamique de l'écoulement pendant l'admission et la compression. Cette méthode appliquée sur chaque phase moteur consiste à isoler les principales composantes du mouvement à une phase déterminée en projetant les données sur une base orthonormée choisie d'une manière qui maximise l'énergie représentée. La décomposition modale ainsi obtenue assure qu'il n'y a aucune autre combinaison de vecteurs orthogonaux qui produit des modes avec une plus grande énergie. Cependant, cette application de la POD donne des bases qui ne décrivent que la phase à partir de laquelle elles sont calculées plutôt que l'écoulement entier. On a pu ainsi séparer à une phase déterminée les différentes échelles de structures qui forment l'écoulement dans le cylindre. En particulier dans un moteur essence, on cherche à identifier et à analyser les instabilités de la structure tourbillonnaire cohérente appelée « tumble » [5] [7] dont l'axe de rotation est perpendiculaire à l'axe du cylindre. Cela est possible en reconstruisant les champs de vitesse à l'aide des premiers modes POD, ceux-ci étant les plus énergétiques [2][8]. Les structures cohérentes sont alors identifiées avec plus de précision et leurs propriétés sont plus facilement accessibles. Ainsi, sachant que la variabilité en termes d'intensité et de positionnement d'un cycle moteur au suivant du centre du tumble est l'une des principales signatures des variations cycle-à-cycle, on cherche à l'identifier sur les champs de vitesse reconstruits, le long d'une série de cycles moteurs successifs.

## Critère Gamma

Pour cela, le critère gamma  $\Gamma$  d'identification du centre du tourbillon [4] a été utilisé à l'aide d'un programme développé au laboratoire. En particulier, à proximité du centre du tourbillon, gamma atteint des valeurs allant de 0.9 à 1. La détection ensuite du maximum local détermine l'emplacement du centre du tumble. L'application du critère gamma sur les champs de vitesse reconstruits et sur les cycles moteurs moyens nous a permis de suivre les fluctuations du centre du tumble pour chaque cas de fonctionnement du moteur. L'utilisation de ce critère sur des champs reconstruits par POD a permis d'éviter les problèmes usuellement rencontrés lors de l'application d'autres critères basés sur des quantités locales (vitesse, vorticité...) qui sont largement influencés par les structures à petite échelle [6].

## 4. Résultats et discussions

La figure 5 présente des champs de vitesse filtrés et reconstruits à partir des 5 premiers modes POD, tracés à la même phase moteur du cas C à mi-compression, pour 3 cycles moteurs successifs lorsque  $N=2000$  tr/min. Les variations des structures cohérentes de l'écoulement sont ainsi clairement observées. La superposition des champs reconstruits avec les champs scalaires  $\Gamma$  permet de délimiter la zone tourbillonnaire. Ensuite, le centre du tumble est identifié aux coordonnées de la valeur maximale de gamma et a été marqué par une croix en rouge sur la figure 5.

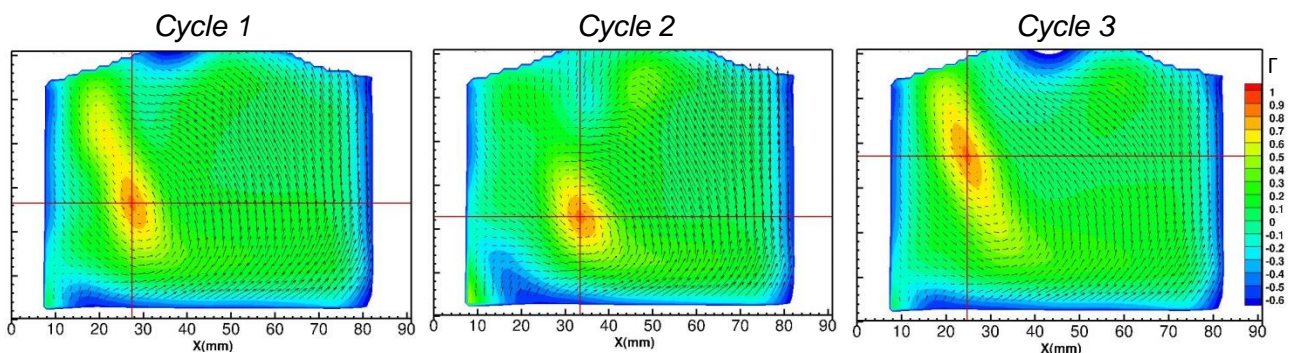


Figure 5. VCC à  $N = 2000$  tr/min et  $C=25\%$ : champs de vitesse reconstruits pour 256 DV avec les 5 premiers modes POD superposés aux champs du critère gamma correspondants

L'application de ce processus le long des cycles moteur moyens a permis d'obtenir les trajectoires moyennes du centre du tumble pour les 6 cas du fonctionnement du moteur (figure 6). On remarque d'abord la ressemblance pendant la phase d'admission entre les 2 cas A et B où le centre du tumble suit une trajectoire 'circulaire' dans le plan de mesure. D'autre part, pour le mode de fonctionnement C, un décalage durant l'admission du centre du tumble se manifeste vers le centre du cylindre et une trajectoire plus rectiligne a lieu durant la compression. On peut alors noter que le changement de la trajectoire durant l'admission a été accompagné par un changement également durant la compression. Afin d'atteindre plus de détails sur l'influence de l'admission sur la phase de compression, on a tracé la dispersion des centres instantanés autour de la trajectoire moyenne et l'écart-type (rms) qui s'en découle (figure 8). Un exemple de ces dispersions est montré dans la figure 7 pour les 2 vitesses de rotation à une ouverture de 25% du papillon. On peut d'abord déduire que dans tous les cas, les variations du centre du tumble durant la phase de compression sont plus fortes que pendant l'admission.

Quant à la rms, un comportement similaire aux mêmes phases moteur peut être noté entre A et B. Cela se traduit par 2 pics autour de 100 et 200 DV correspondant à mi-admission et

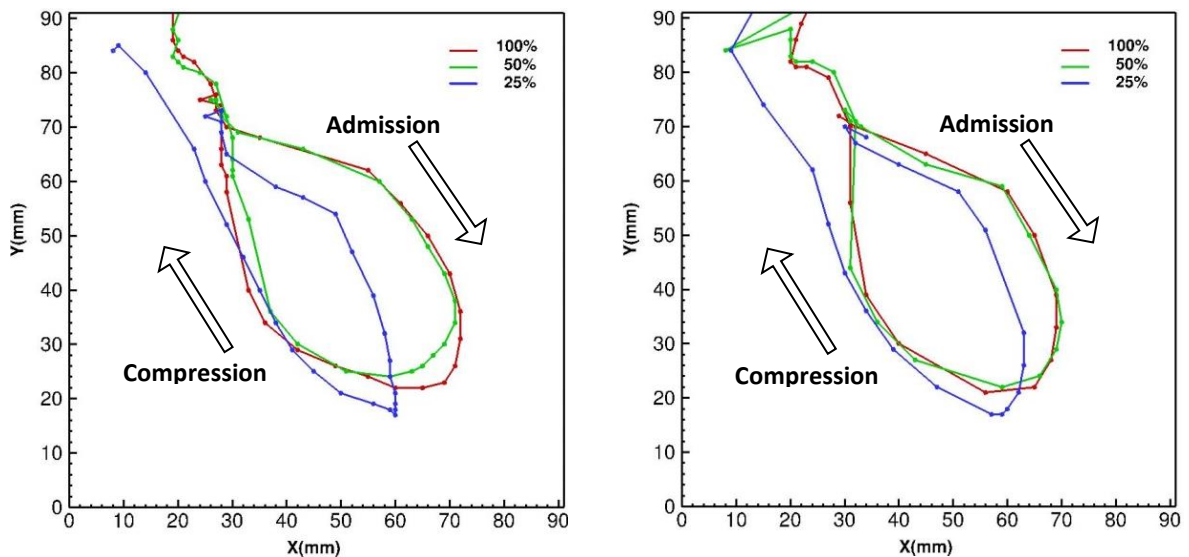


Figure 6. Trajectoires moyennes du centre du tumble pour les ouvertures A, B et C de la tubulure d'admission, à 2000 tr/min (à gauche) et à 3000 tr/min

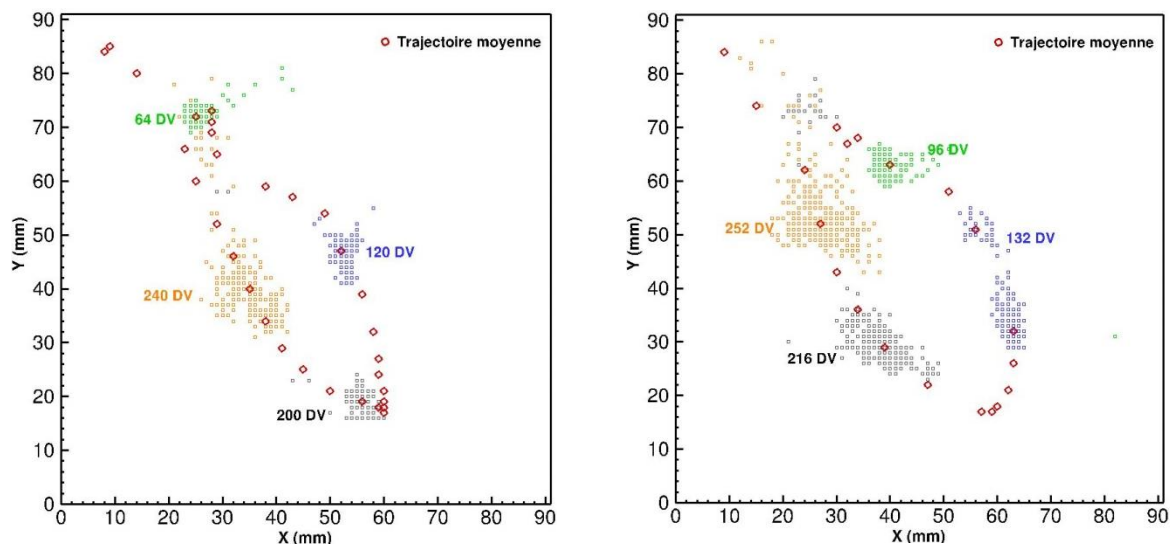


Figure 7. Dispersions du centre de tumble autour des trajectoires moyennes du mode C pour  $N=2000$  tr/min (à gauche) et  $N=3000$  tr/min

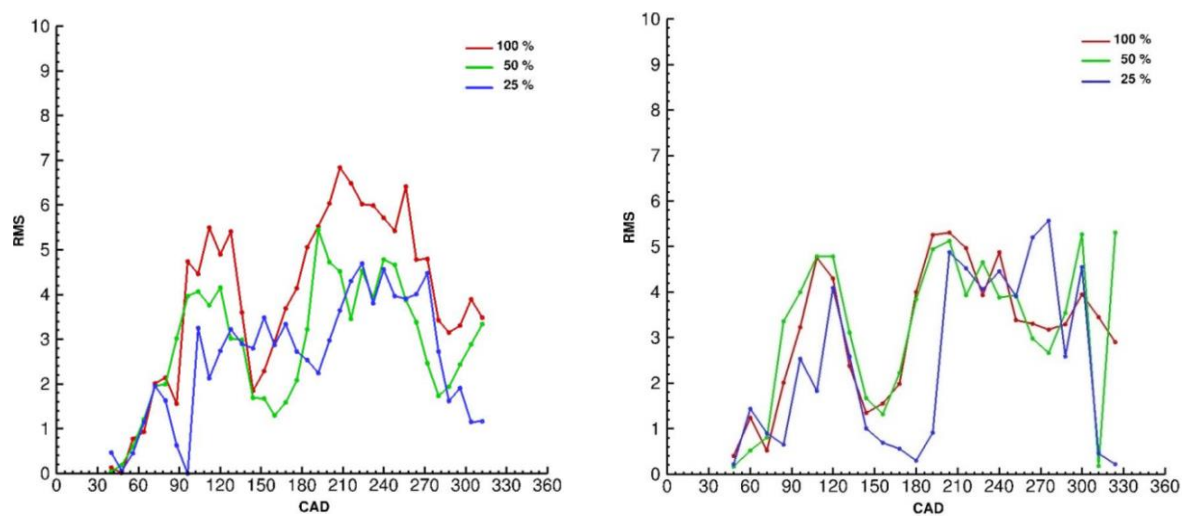


Figure 8. Ecart type des centres instantanés du tumble en fonction du degré vilebrequin et de la condition d'admission pour  $N=2000$  tr/min (à gauche) et  $N=3000$  tr/min



au début de la compression, et 2 minimums autour de 160 et 280 DV. Les valeurs de la rms durant la compression étant supérieures à celle notées en admission rappellent la forte variabilité cyclique observée au cours de la compression. Quant au cas C, outre les différences par rapport aux cas A et B, les allures sont différentes pour les 2 vitesses de rotation mais présentent toujours un pic autour de 270 DV, et un minimum autour de 180 DV, i.e. à la fin de l'admission. Enfin, les valeurs de la rms du cas C durant la compression sont aussi supérieures à celles correspondant à la phase d'admission.

## 5. Conclusion

Grâce à la PIV haute cadence, l'écoulement dans le moteur entraîné a été représenté pendant les 2 phases d'admission et de compression par des mesures de vitesse spatio-temporelles pour des cycles moteur successifs. Après le traitement PIV optimisé et l'application de la POD sur chaque phase moteur, le centre du tumble moyen et les centres instantanés ont été identifiés à l'aide du critère gamma. Leur dispersion a été mesurée pour plusieurs conditions de fonctionnement du moteur et les variations cycle-à-cycle se sont montrées plus fortes au cours de la compression que pendant la phase d'admission. Enfin, on a pu décrire l'influence de 3 ouvertures différentes de la tubulure d'admission, soient 100%, 50% et 25%, sur la circulation du centre du tumble dans le cylindre avec un chemin plus centré dans le cylindre pour C=25% et plus circulaire pour A et B.

## Références

- [1] Jacques Borée and Paul C Miles. "In-Cylinder Flow." *Institut Pprime, Cnrs, Université De Poitiers*.
- [2] Chen, Hao, David L Reuss, and Volker Sick. 2012. "On the Use and Interpretation of Proper Orthogonal Decomposition of in-Cylinder Engine Flows." *Measurement Science and Technology* 23(8): 085302.
- [3] Goryntsev, D., A. Sadiki, M. Klein, and J. Janicka. 2009. "Large Eddy Simulation Based Analysis of the Effects of Cycle-to-Cycle Variations on Air-Fuel Mixing in Realistic DISI IC-Engines." *Proceedings of the Combustion Institute* 32 II(2): 2759–66. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proci.2008.06.185>.
- [4] Graftieaux, Laurent, Marc Michard, and Nathalie Grosjean. 2001. "Combining PIV, POD and Vortex Identification Algorithms for the Study of Unsteady Turbulent Swirling Flows." *Meas. Sci. Technol. Meas. Sci. Technol* 12(1201): 1422–29. <http://iopscience.iop.org/0957-0233/12/9/307>.
- [5] Holmes, Philip J. et al. 1997. "Low-Dimensional Models of Coherent Structures in Turbulence." *Physics Reports* 287: 337–84. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370157397000173>.
- [6] Kolář, Václav. 2007. "Vortex Identification: New Requirements and Limitations." *International Journal of Heat and Fluid Flow* 28(4): 638–52.
- [7] M. Voisine, L. Thomas, J. Borée, P. Rey. 2010. "Structure and in-Cycle Evolution of an in-Cylinder Tumbling Flow." *15th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics Lisbon, Portugal, 05-08 July, 2010 - 1*.
- [8] Mark Fogleman, John Lymley et al. 2004. "Application of the POD to Datasets of IC Engine Flows." *Journal of Turbulence*.
- [9] Sirovich. 1987. "Low-Dimensional Procedure for the Characterization of Human Faces."