

Application de la méthode de PIV en simultané dans les huit tubulures d'un répartiteur d'admission sur un moteur automobile en fonctionnement

Dimitri BONNET^{a,b}, Magali BARTHES^a, Laurent GIRARDOT^a et Yannick BAILLY^{a,1}

(a) Institut FEMTO-ST – UMR CNRS 6174, Département Energie, 90000 Belfort

(b) Institut UTINAM, UMR 6213, 16 route de Gray, 25030 Besançon Cedex

1 Contexte et objectifs

Dans un contexte où l'économie de nos ressources naturelles et la préservation de la qualité de notre environnement deviennent des enjeux cruciaux, la connaissance et la maîtrise des écoulements à l'intérieur de la boucle d'air automobile deviennent impératives. Inclus dans cette recherche permanente d'amélioration des performances des moteurs dédiés à l'automobile, le projet SIMBA (SIMulation de la Boucle d'Air) ambitionne de modéliser l'intégralité de la boucle d'air nécessaire au fonctionnement du moteur thermique. Cette boucle est constituée de différents éléments, connus individuellement, dont il faut surtout déterminer les interactions. Pour vérifier la validité du modèle créé, l'Institut FEMTO-ST doit réaliser de nombreuses mesures (pression, température et vitesse) tout au long de la boucle d'air d'un moteur Diesel DV6 de série en fonctionnement, et ce pour des régimes représentatifs. Dans le cadre de ce papier, nous nous intéressons uniquement aux écoulements qui régissent le fonctionnement du répartiteur d'admission, avec et sans retour EGR (Recirculation des Gaz d'Echappement). Cet organe a pour rôles d'assurer le mélange entre l'air provenant de l'admission et les gaz issus du retour EGR d'une part et de distribuer d'autre part ce mélange gazeux vers les cylindres au travers de conduits circulaires. Les écoulements à l'intérieur des cylindres sont directement impactés par le design du répartiteur d'admission et par l'intensité du retour EGR qui est le dispositif permettant de ralentir la combustion et de diminuer ainsi les rejets en oxydes d'azote dans l'atmosphère.

Les méthodes optiques sont très largement utilisées en mécanique des fluides car elles sont dites non-intrusives. Parmi plusieurs techniques, la Vélocimétrie par Image de Particules (PIV) est très certainement celle qui est la plus employée. Basée sur des techniques de corrélation ou de flot optique appliquées sur deux images successives d'un même plan d'un écoulement ensemené, la PIV permet d'obtenir des champs de déplacement 2D [1]. La calibration spatiale du système optique et la connaissance de l'écart de temps imposé entre les deux pulses laser permet d'obtenir les champs de vecteurs vitesse instantanés.

Concernant la métrologie appliquée dans le répartiteur d'admission ou dans les tubulures du répartiteur, la littérature présente majoritairement des mesures de pression et de température [2]. Rares sont les références qui traitent de l'instrumentation d'un moteur par des méthodes optiques car les contraintes sont nombreuses. En effet, le moteur est un ensemble compact où peu de place reste disponible pour l'installation d'un appareillage complexe de mesures optiques. Par ailleurs, les vibrations sont défavorables à la réalisation de ce type de mesures. Enfin, les zones d'émission laser et de réception des images doivent être transparentes et rester propres ce qui est délicat avec un écoulement chargé de suies ou de gouttes d'huile. L'encrassement induit une diminution de la qualité des images [3] et dégrade les résultats obtenus. Ces contraintes expliquent en partie pourquoi la majorité des expériences sont effectuées sur un moteur de laboratoire [4] (souvent entraîné donc sans combustion) et non pas sur un véritable moteur en ambiance industrielle.

¹ Correspondant : yannick.bailly@univ-fcomte.fr

La mesure de champ de vitesse par technique optique a déjà été réalisée au niveau de l'admission [5] par Vélocimétrie Laser Doppler et par PIV aux niveaux des cylindres [6] et du turbocompresseur [7]. Cependant, des mesures effectuées par PIV au sein de la boucle d'air restent peu communes.

De précédents travaux, menés en différents emplacements de la boucle d'air (admission, échappement...) ont permis de démontrer la faisabilité et d'appliquer la PIV le long des conduites de la boucle d'air [8],[9]. Le répartiteur d'admission est le seul organe de la boucle qui dirige l'écoulement principal amont vers l'aval suivant 8 directions différentes. Mesurer les champs de vitesse instantanés dans les huit tubulures de manière simultanée est un défi que nous avons choisi de relever. Nous avons travaillé au niveau des 8 tubulures du répartiteur d'admission d'un moteur diesel calé sur un régime moteur représentatif de 1500 tr/min et une charge correspondant à un couple de 40 Nm. Pour éprouver notre système vis-à-vis des phénomènes d'encrassement et recueillir des mesures pertinentes, nous avons appliqué différents pourcentages d'ouverture de la vanne de retour EGR (0, 29 et 35%). Pour ces mesures contraignantes sur moteur en fonctionnement, la conception spécifique d'un banc expérimental complet, nous a permis d'enregistrer simultanément les images de type PIV des 8 tubulures. Le dépouillement de ces clichés très particuliers a également nécessité le développement d'un logiciel de prétraitement et de traitement des images.

2 Dispositif expérimental

Le banc que l'on a réalisé permet de s'adapter aux contraintes pour supprimer ou réduire l'impact de celles-ci sur nos mesures.

La première contrainte est la compacité du moteur qui laisse très peu d'espace pour la mise en place des ensembles émission laser et réception d'images. Notre prototype global est un système modulaire qui comprend une partie génération de nappe, une partie acheminement et orientation des nappes aux niveaux des tubulures et une partie réception des images. Trois lentilles transforment en nappe les faisceaux émis par un laser Nd:Yag double impulsion. Ce plan lumineux est divisé, dirigé et orienté par 7 cubes séparateurs et 19 prismes de renvoi tout en respectant les longueurs des trajets optiques pour introduire à 90 degré de la réception huit nappes similaires (hauteur, épaisseur, énergie,...) dans les tubulures. Cet ensemble compact, constitué de 26 éléments optiques, permettant d'acheminer individuellement les nappes, est situé au cœur du moteur entre les tubulures du répartiteur. Pour obtenir une résolution spatiale suffisante, la réception des images se fait par moitié de chaque côté du répartiteur au moyen de deux caméras à intercorrélation. Afin de respecter des longueurs de trajet optique identiques entre les capteurs CCD et les nappes, les 4 images du côté dit Tangentiel « T » sont prises grâce à 13 miroirs et les 4 autres du côté dit Hélicoïdal « H » grâce à 11 miroirs. Les différences de chemin optique sont ainsi compensées malgré la dissymétrie du répartiteur et le stigmatisme du système d'observation est garanti. Ces appellations « T » et « H » correspondent respectivement au type d'écoulement, à savoir « Tangentiel » et « Hélicoïdal ».

La deuxième contrainte se situe au niveau vibratoire. Un moteur en fonctionnement induit de grandes vibrations, souvent incompatibles avec la mise en place d'un système optique. L'ensemble du dispositif, monté sur un même châssis relié au moteur, est complexe mais tous ses éléments sont solidaires ce qui autorise une vibration globale sans engendrer de désalignement. Le banc d'essai dans son ensemble est donné en Figure 1. Seul organe du système PIV à ne pas être connecté directement au moteur, le système d'ensemencement (gouttelettes d'huile) est situé en amont du répartiteur, au niveau de la tubulure d'admission.

La troisième contrainte est liée à la géométrie circulaire des tubulures dans lesquelles nous souhaitons effectuer nos mesures. De tels conduits induisent des réflexions parasites d'une part et de fortes déformations optiques liées au rayon de courbure du tube d'autre part qui dégradent fortement la qualité des images. Pour réduire les sources de réflexions, supprimer l'effet de dioptrisme non-plan et agrandir l'espace central entre les tubulures, nous avons développé et réalisé une pièce d'adaptation. Cet élément permet le passage progressif d'une section circulaire à une section carrée, sans induire de modifications de débit et autorise surtout la mise en place de fenêtres de visualisation planes sur trois faces de chaque tubulure. Côté émission, la mise en

place de deux parois transparentes en vis-à-vis autorise la traversée complète de la nappe laser et minimise les réflexions (le plan lumineux est transmis à l'extérieur de la tubulure). La réception est également faite au travers d'une fenêtre plane qui supprime les aberrations optiques liées à la courbure d'une tubulure normale. Toujours dans un souci de limiter des réflexions parasites, les cellules de visualisation ont été recouvertes d'une peinture spécifique qui, associée à un filtre interférentiel, permet d'enregistrer la contribution de la lumière diffusée par les particules de manière presque exclusive. Nous verrons par la suite que des réflexions résiduelles subsistantes seront supprimées grâce au prétraitement des images. Un schéma du répartiteur d'admission avec les tubulures modifiées est donné sur la Figure 2.

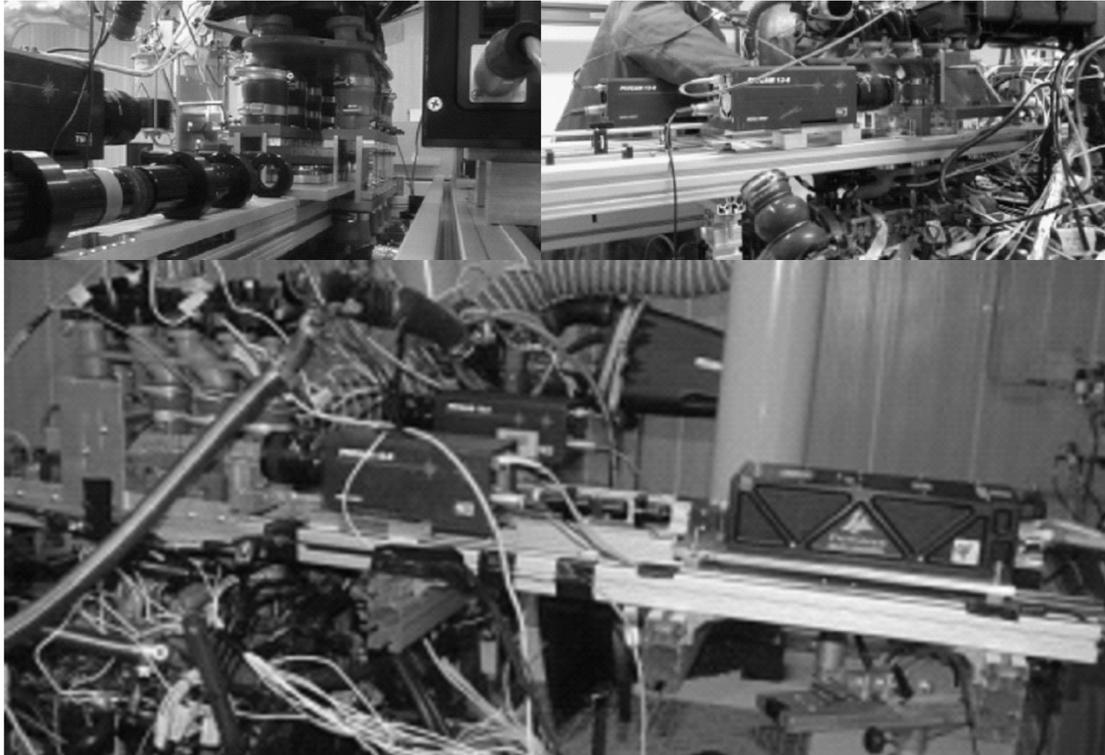


Figure 1 – Banc moteur et montage PIV associé

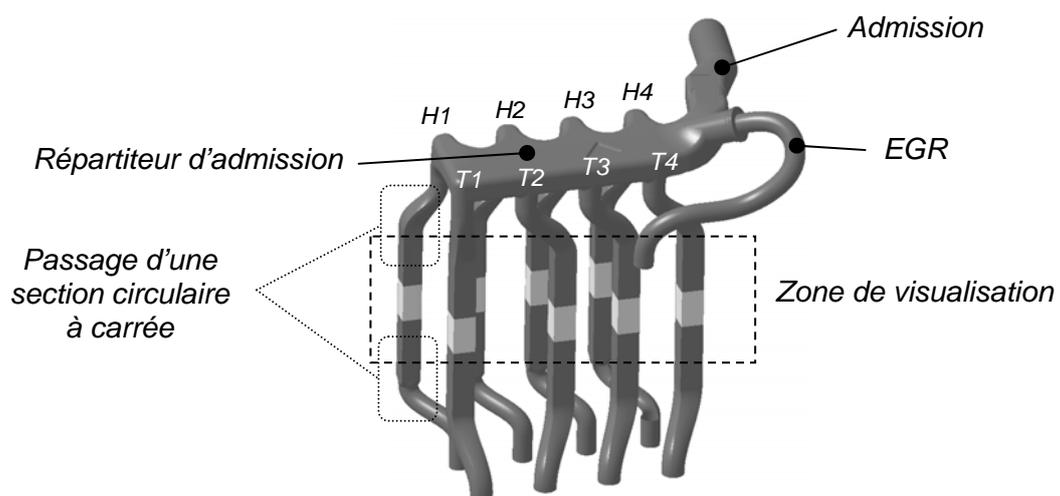


Figure 2 – Répartiteur d'admission avec passage de sections circulaires à carrées pour les 8 tubulures.

Enième contrainte, en cours de fonctionnement, le moteur n'est pas un environnement « propre » au sens salissures. Ainsi les suies et les huiles par exemple sont capables d'opacifier nos veines

d'essais et de dégrader ou d'empêcher toute visualisation optique. Ce phénomène d'encrassement est inévitable et s'accroît lorsque la vanne de retour EGR est actionnée. Notre banc de visualisation a donc été pensé de manière à être le plus modulable possible afin de pouvoir réaliser aisément des nettoyages lorsque l'on observe une dégradation des images.

Prises par une même caméra, les images individuelles des 4 tubulures d'un côté sont visées au travers de miroirs. L'agencement de ces éléments optiques induit des transformations géométriques de types rotation et/ou miroir différentes pour chaque tubulure. Les images devront donc être prétraitées avant l'application du procédé de corrélation.

Synchronisé avec l'acquisition des images, un système d'acquisition de données a permis d'enregistrer simultanément le degré vilebrequin du moteur et les déclenchements des pulses laser. Ces données temporelles qui associent chaque paire d'images PIV au degré vilebrequin correspondant rendent possible la détermination de champs de vitesse synchronisés en phase.

3 Traitement des images et résultats

Nos images PIV sont composées chacune de quatre images de tubulures individuelles orientées différemment en fonction du dispositif optique. De plus, il existe un déplacement relatif entre les différentes paires d'images et il subsiste quelques réflexions résiduelles malgré toutes les précautions expérimentales prises. Nous avons donc spécifiquement développé un programme de prétraitement de nos clichés, associé à un programme de traitement PIV.

3.1 Prétraitement des images

Développé pour notre application, le logiciel doté d'une interface graphique, est codé en langage python.

Le premier objectif du prétraitement est de recalcr les images successives afin qu'elles aient la même origine spatiale ce qui corrige l'effet de distorsion du banc optique dû aux vibrations. Le temps séparant l'image A_i de l'image B_i constituant une paire d'image PIV étant très court, aucun déplacement n'est visible. En revanche, entre la paire d'images A_i, B_i et la paire A_{i+1}, B_{i+1} , un déplacement est notable. Pour déterminer et corriger ce mouvement relatif entre deux paires d'images successives, une corrélation a été effectuée sur les parties fixes non liées aux écoulements entre chaque paire A_i, B_i et une paire de référence A_0, B_0 . Le déplacement déterminé est ensuite utilisé pour créer de nouvelles images par translation de la valeur du déplacement des anciennes images.

La deuxième action du logiciel est la suppression des réflexions résiduelles par soustraction d'une image de fond moyenne calculée après recalage d'images enregistrées sans ensemencement.

La dernière qualité du prétraitement est l'aptitude à sélectionner les différentes régions d'intérêt sur une image globale et de les traiter de manière à obtenir l'image des tubulures dans le même sens. Le logiciel découpe sur chaque image les 4 régions d'intérêt et applique une rotation et/ou un effet miroir en fonction des éléments optiques constituant le trajet optique considéré afin de recréer des sous-images, toutes orientées dans le sens de l'écoulement.

En résumé, chaque paire d'image prétraitée est dans un premier temps recadrée avec les images de fond. Puis une moyenne est effectuée dans un deuxième temps sur les images de fond recadrées. Cette image moyenne est retranchée aux images à traiter précédemment recadrées. Enfin, les 4 zones d'intérêt sont déterminées et les 4 sous-images obtenues sont corrigées (rotation/miroir).

3.2 Traitement des images

Le développement d'un logiciel de PIV s'est imposé car nous devons traiter simultanément 4 zones d'intérêt pour chaque caméra. La Figure 3 présente un exemple d'images enregistrées par les deux caméras. Ces clichés mettent en évidence la présence des 8 zones d'intérêt correspondant à chaque tubulure.

Notre traitement PIV basé sur l'intercorrélation utilise un processus itératif [10]. Pour chaque image, nous définissons 4 sous-images qui correspondent aux 4 zones d'intérêt. Etant donné la non-

symétrie du répartiteur et les différences de grandissement entre les deux côtés, ces sous-images sont de tailles différentes à savoir 128 par 384 pixels pour les tubulures « T » et 128 par 320 pixels pour les tubulures « H ». Nous définissons une zone d'interrogation (IA) de 64 par 64 pixels, associée à un pas de déplacement dans les deux directions de 8 pixels. Le processus de PIV appliqué est itératif. Un premier passage par la corrélation, effectué avec les paramètres précédents permet d'obtenir le déplacement de chaque IA avec une précision de l'ordre du pixel. Connaissant ce déplacement, un nouveau maillage est appliqué à l'image B pour l'application d'un second processus de corrélation qui conduit à la détermination d'un champ de déplacement dont la précision est sub-pixel.

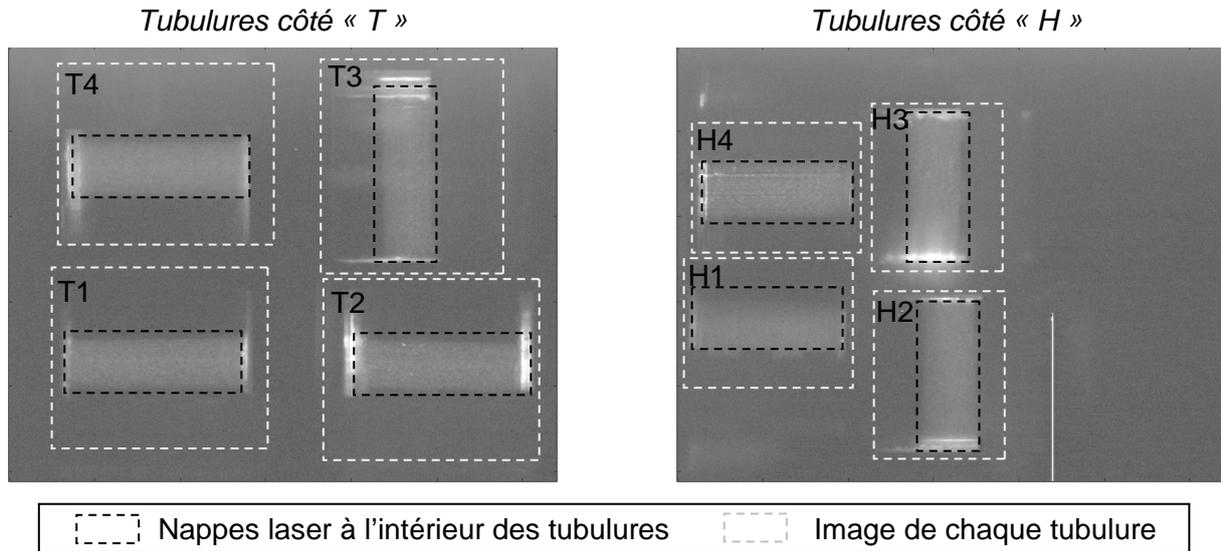


Figure 3 : Exemple d'images obtenues sur chaque caméra. Les zones correspondant aux tubulures T ou H, ainsi que les nappes lasers y sont visibles.

Ces champs de déplacements sont ensuite filtrés pour éliminer les valeurs aberrantes en imposant une valeur seuil au ratio calculé entre le maximum du second pic de corrélation et le maximum du pic principal. La dernière étape est le calcul direct des champs de vecteurs vitesse qui découle de la double connaissance du temps séparant les deux images A et B et de la calibration spatiale.

3.3 Résultats

Des champs de vecteurs vitesse instantanés sont calculés pour chaque degré vilebrequin (phase). Un exemple avec vanne de retour EGR fermée est donné sur la Figure 4 où les 8 tubulures apparaissent simultanément. Ces 8 champs représentés pour 4 degrés de vilebrequin différents, montrent l'activité principale d'un seul couple de tubulure (H, T) pour une phase donnée d'une part et l'aspect cyclique du fonctionnement du moteur diesel d'autre part. Cette figure montre que notre prototype PIV atteint l'objectif de mesures simultanées dans les 8 tubulures du répartiteur d'admission d'un moteur en fonctionnement. Cependant, certaines zones ne permettent pas toujours un traitement optimal et complet du champ exploré. De l'ordre d'une cinquantaine de minutes, la durée d'acquisition d'un essai peut dans certain cas conduire à la dégradation de la qualité de nos images sous l'effet de l'encrassement des parois de visualisation par de l'huile et de la suie.

A partir des différents champs de vecteurs instantanés obtenus, une intégration spatiale sur la vitesse de chaque sous-image permet de dégager la vitesse débitante pour chaque tubulure. Cette grandeur est ensuite associée au degré vilebrequin correspondant pour tracer les courbes des vitesses débitantes de chaque tubulure en fonction du degré vilebrequin (i.e. l'évolution temporelle dans chaque tubulure). Les pics de vitesse qui correspondent à une ouverture de soupape sont donnés en négatif car l'écoulement se fait vers le bas. Nous constatons que ces pics de vitesse

ont à peu de chose près la même intensité. Le fait d'avoir des pics plus ou moins marqués provient certainement du degré de finesse de notre filtrage qui ne peut être ajusté phase par phase vu le nombre de données à traiter. Ces vitesses résultent d'une intégration spatiale sur une fenêtre donnée où certains vecteurs faux (liés à l'encrassement par exemple) peuvent ne pas avoir été éliminés par le filtrage basé sur le ratio entre les pics de corrélation. Un nouveau filtre médian sur les vitesses moyennes en fonction du degré vilebrequin permet de supprimer les vitesses manifestement aberrantes. De plus, pour une même phase, plusieurs paires d'images sont enregistrées et traitées ce qui permet après l'application du filtre médian de réaliser une moyenne des vitesses moyennes associées à cet angle.

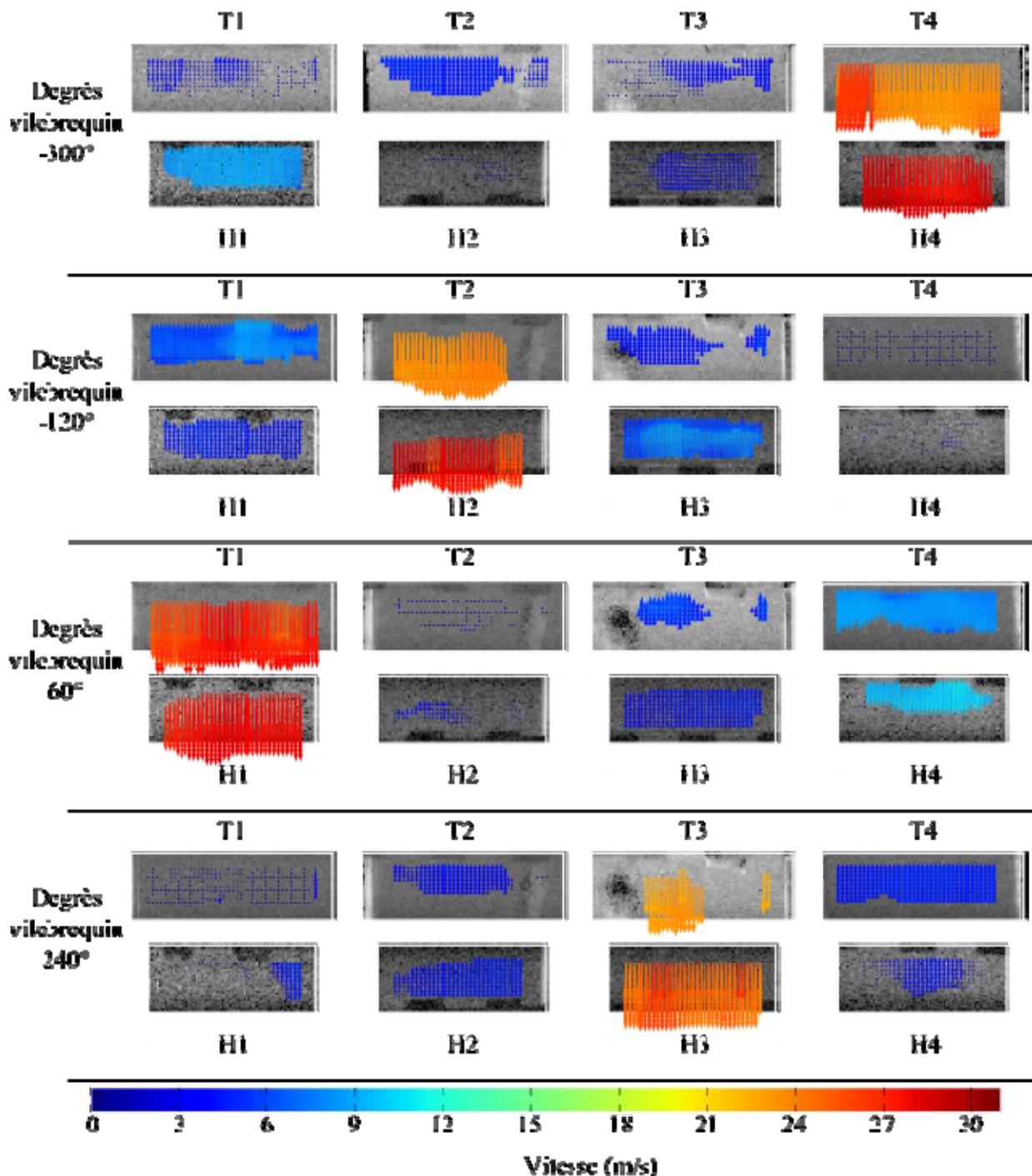
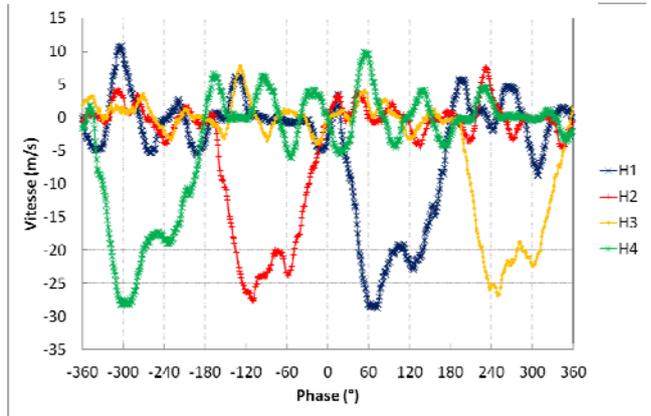
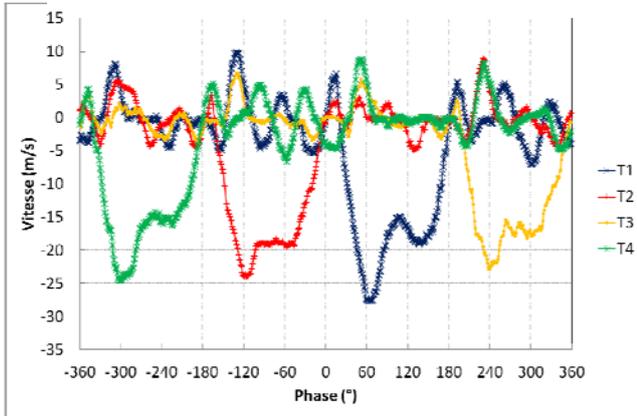
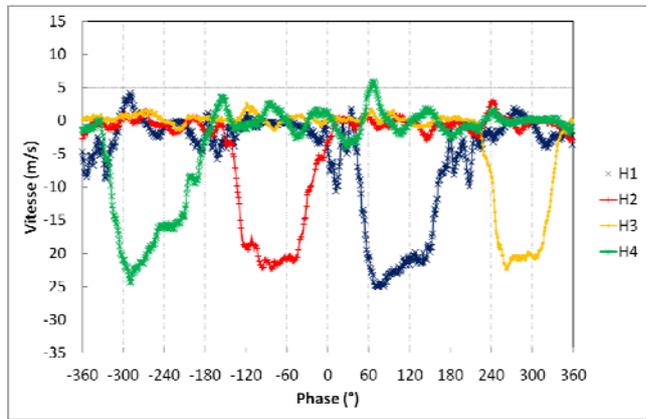
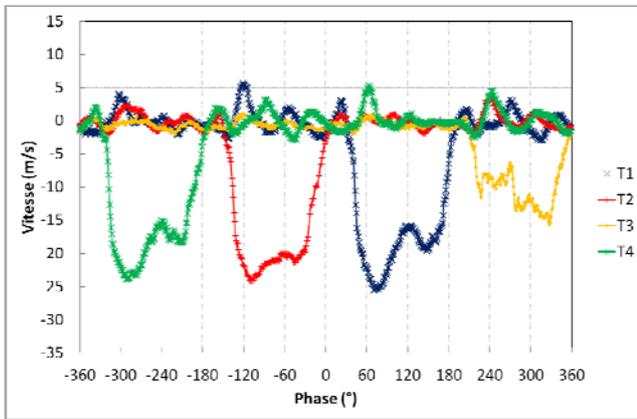


Figure 4 : Champs de vitesse instantanés dans les huit tubulures, pour un régime moteur de 1500rpm, 40Nm, et 0% d'ouverture de la vanne de retour EGR.

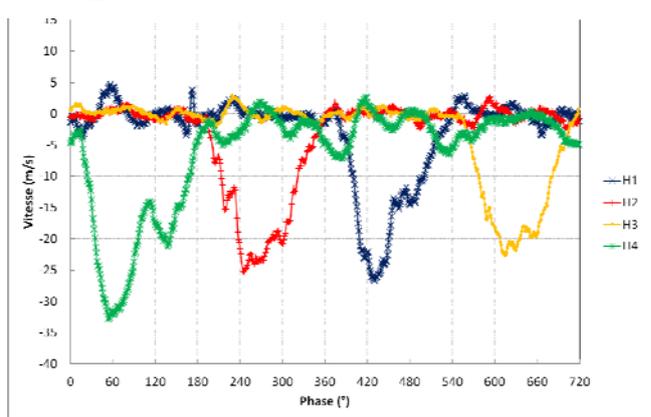
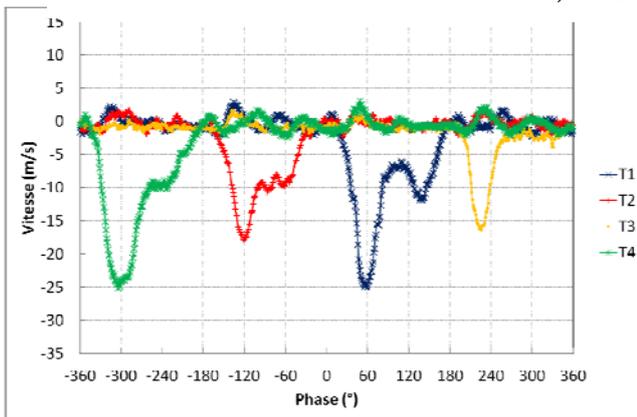
1500tr/min, 40Nm, vanne EGR=0%



1500tr/min, 40Nm, vanne EGR=29%



1500tr/min, 40Nm, vanne EGR=35%



Tubulures « T »

Tubulures « H »

Figure 5 : Vitesses moyennes dans chaque tubulure en fonction de la phase (degré vilebrequin) pour différentes ouvertures de la vanne EGR.

4 Conclusion

Le nombre important de contraintes expérimentales liées à cet environnement moteur (compacité, encrassement, réflexion, vibrations, 8 tubulures, non-symétrie,...) nous a imposé le développement et la réalisation d'un montage expérimental spécifique et très complexe pour permettre la mise en œuvre de la technique PIV. Notre prototype expérimental, qui se décline aujourd'hui en deux versions, fournit des images PIV de qualité qui sont prétraitées et traitées par un logiciel que nous avons dû développer de manière tout aussi spécifique. Pour illustrer le fonctionnement de notre système métrologique nous avons présenté les résultats obtenus pour un régime moteur représentatif de 1500 tr/min chargé à 40Nm tout en faisant varier les pourcentages d'ouverture de la vanne de retour EGR (0, 29 et 35%). Les champs de vitesse instantanés dans les 8 tubulures sont associés au degré vilebrequin correspondant, ce qui nous permet de déduire l'évolution temporelle des vitesses dans chaque tubulure du répartiteur d'admission. L'objectif de mesurer simultanément les champs de vecteurs vitesse dans les 8 tubulures d'un répartiteur d'admission d'un moteur en fonctionnement est atteint.

Références

- [1] M. Raffel et al., « Particle image velocimetry, a practical guide », Springer, Berlin (1998).
- [2] Y. He, Effect of intake primary runner blockages on combustion characteristics and emissions in spark ignition engines, Ph.D. thesis, The Ohio State University, the USA, (2007).
- [3] P. Stansfield, G. Wigley, T. Justham, J. Catto, G. Pitcher, Piv analysis of in-cylinder flow structures over a range of realistic engine speeds, Experiments in fluids-Vol. 43, 135–146, (2007).
- [4] S. Müller, B. Böhm, M. G. ner, R. Grzeszik, S. Arndt, A. Dreizler, Flow field measurements in an optically accessible, directinjection spray-guided internal combustion engine using highspped piv, Experiments in fluids –Vol.48, 281–290, (2010).
- [5] L. Le Moyne, F. Maroteaux, P. Guibert, M. Murat, Model and measure of flows at the intake of engines, Journal de Physique III –Vol.7, 1927–1940, (1997).
- [6] C. Fajardo, V. Sick, Flow field assessment in a fired sprayguided spark-ignition direct-injection engine based on uv particle image velocimetry with sub crank angle resolution, Proceedings of the combustion institute –Vol.31, 3023–3031, (2007).
- [7] P. Mahendra, M. Olsen, Unsteady velocity field measurements at the outlet of an automotive supercharger using particle image velocimetry (piv), Experimental Thermal and Fluid Science –Vol. 33, 405–423, (2009).
- [8] F. Guermeur, L. Girardot, Y. Bailly, Y. Perrot, E. Grappein, «Phase locked piv measurements in an inlet manifold », ISFV13, Nice, France, (2008).
- [9] D. Bonnet, M. Barthès, D. Ramel, L. Girardot, Y. Bailly, F. Guermeur, D. Guyon, A. Grenier, Y. Perrot, D. Ragot, « Vélodimétrie par PIV d'écoulements pulsés instationnaires sur banc moteur industriel », Congrès de Mesures et Techniques Optiques pour l'Industrie, Toulouse-Labège, France, (2010).
- [10] J. Westerweel, D. Dabiri, M. Gharib, « The effect of a discrete window offset on the accuracy of cross-correlation analysis of digital piv recordings », Experiments in Fluid- Vol. 23, 20-28, (1997).

Remerciement

Ce travail a été financé par le projet de recherche « SIMBA » supporté par l'état français (contrat N° 072906524) et par la communauté d'agglomération du pays de Montbéliard. Les expérimentations ont été menées sur le banc moteur du CEMBA de R&D Moteur.