

Analyse statistique des cohérences spatiales et spatio-temporelles en moteur à piston. Outils et applications.

J. Borée

Institut Pprime Dept. « FTC »

CNRS, ENSMA, Université de Poitiers

Téléport 2, 1 avenue Clément Ader BP 40109

86961 Futuroscope Chasseneuil; France

E-Mail: jacques.boree@ensma.fr

Un défi actuel, bien identifié, pour le développement de moteurs à combustion propres et économes, réside dans la compréhension et la maîtrise des fluctuations cycles à cycles (CCV pour l'acronyme anglais). Cette variabilité cyclique doit être comprise comme une variation à grande échelle de l'écoulement et de la composition des gaz dans le cylindre. La plupart des technologies avancées envisagées actuellement se placent aux limites de stabilité pour la combustion. Dans ces conditions, les CCV se traduisent de façon intermittente par une mauvaise combustion, du cliquetis qui peut endommager le moteur, voire des cycles non allumés. Ce sont donc des obstacles au dessin de moteurs aux stratégies de combustion optimisées puisque des marges de sécurité importantes doivent être adoptées par les constructeurs.

Ce défi industriel et environnemental entraîne une activité de recherche conséquente. Les développements récents des technologies de mesures non intrusives permettent l'obtention de mesures de vitesse et de concentration, éventuellement couplées et à différentes échelles. Du côté de la modélisation, les simulations aux grandes échelles (LES) ou hybrides RANS/LES deviennent matures. Ces approches numériques (Haworth and Jansen 2000; Hasse et al. 2009; Vermorel et al. 2009; Hasse et al. 2010; Granet et al. 2012) et expérimentales (Reuss et al. 1995; Cosadia et al. 2006; Alharbi and Sick 2010; Dannemann et al. 2010; Kapitsa et al. 2010; Keromnes et al. 2010; Müller et al. 2010; Müller et al. 2011; Voisine et al. 2011) sont donc appliquées dans la géométrie complexe des moteurs, en tenant compte précisément des conditions aux limites. Tous ces moyens d'investigation produisent des bases de données conséquentes qu'il faut analyser. Il faut donc en parallèle développer des techniques d'analyse pertinentes, techniques conçues pour être en phase avec les problèmes physiques étudiés. Pour les écoulements moteurs, et d'ailleurs pour une très large classe d'écoulements internes ou externes fortement décollés, il faut fournir :

- (i) des événements clés associés aux CCV, incluant les structures d'écoulement, leur énergie cinétique et le mélange associé ;
- (ii) des méthodologies et guides d'analyse objectifs pour comparer les simulations instationnaires aux expérimentations ;
- (iii) des indications pertinentes pour la modélisation de la turbulence, incluant la définition de décompositions triples et le test rigoureux des fermetures associées puisque ni la comparaison de champs instantanés, ni celle de moments statistiques au point n'est suffisante dans ce cas.

L'exposé s'organisera autour de l'exemple d'un écoulement de rouleau et d'un ensemble de données obtenues sur un banc transparent développé par Renault S.A. (Voisine et al. 2011; Cao et al. 2012). Cet écoulement est souvent adopté dans les moteurs à allumage commandé afin de stocker l'énergie cinétique des jets de soupape dans une structure à grande échelle, moins dissipative, qui se déstabilise en fin de compression. L'ensemble des techniques d'analyse utilisées sera mis en parallèle avec les propriétés physiques élémentaires de la turbulence en moteur. On s'inspirera pour cela de la démarche proposée par Lumley (1999). Des techniques statistiques classiques incluant une extension de la décomposition orthogonale propre (POD) (Maurel et al. 2001; Borée 2003; Hekmati et al. 2011) seront utilisées pendant l'admission pour

étudier le développement des jets de soupape, leur impact sur le piston et leur interaction avec les parois du cylindre.

Des techniques plus récentes, dédiées à la caractérisation de la structure des écoulements seront adoptées pour l'étude de la phase de compression. Plus spécifiquement, nous nous intéresserons tout d'abord à l'interaction écoulement/paroi. Une technique Lagrangienne – LCS pour « Lagrangian Coherent Structure » (Haller 2002; Shadden et al. 2006) – permettra de détecter la dynamique du front de décollement instationnaire associé à la formation du rouleau dans la chambre au début de la compression. Il faut bien souligner que ces décollements instationnaires restent un défi pour la modélisation. En effet, on peut montrer que les couches limites turbulentes ne sont pas en équilibre, ceci même dans la région dites « zone Log » pour des couches limites canoniques dont les propriétés sont souvent implicitement contenues dans la modélisation. Ainsi, pour les maillages actuels utilisés en moteur, aucune technique de calcul ne semble basée sur une modélisation correcte de la physique de l'écoulement en proche paroi. De plus, nous montrerons que ces détections permettent de définir une décomposition triple au voisinage des séparatrices de façon à séparer turbulence portée par l'écoulement et fluctuation de position du décollement (Ruiz et al. 2010).

A la fin de la compression, on observe un transfert d'énergie cinétique du mouvement de rouleau à grande échelle vers une turbulence idéalement à plus petite échelle. Cette phase est cruciale. Elle contient en effet la phase d'allumage dans des conditions thermodynamiques fortement variables ayant un fort impact sur l'initiation et la propagation du front de flamme. Même si la structure tridimensionnelle du rouleau dépend de la géométrie du moteur, incluant celle des conduits d'admission, un examen des statistiques en moyenne de phase publiées dans la bibliographie (Arcoumanis et al. 1990; Hill and Zhang 1994; Borée et al. 2002; Müller et al. 2010; Voisine et al. 2011) montre que le transfert d'énergie de l'écoulement moyen vers la turbulence a toujours lieu au-delà de $q \approx 300$ degrés vilebrequin (DV). De plus, dans des géométries très différentes – machines à compression modèles à piston carré ou géométrie cylindrique – un tracé en semi-Log de l'évolution de l'énergie cinétique en fonction des DV montre que le déclin de l'énergie cinétique de l'écoulement moyen (et donc son transfert vers la turbulence) est exponentiel au-delà de $q \approx 300$ DV et caractérisé par le temps de retournement de la structure à grande échelle. L'écoulement confiné est donc intrinsèquement instable. On peut supposer que l'ellipticité des lignes de courant du rouleau compressé est à l'origine de son instabilité (Lundgren and Mansour 1996; Boree et al. 1999; Lumley 2001), la transition vers la turbulence dans la chambre de compression à l'approche du point mort haut étant pilotée par un cœur tourbillonnaire naturellement instable en interaction forte avec les parois et les décollements associés.

La structure de l'écoulement varie donc très fortement durant la déstabilisation du rouleau en fin de compression. Après normalisation des champs d'écoulement par leur énergie cinétique, l'utilisation de la POD invariante en phase (Fogleman et al. 2004; Fogleman 2005) adaptée à des mesures de PIV rapide (Voisine et al. 2011) permettra de montrer l'existence de CCV à la fois à grande et petite échelle lors de la phase de rupture du rouleau. Enfin, une méthodologie plus simple, adaptée à une base PIV non « résolue » en temps, sera proposée afin de définir une variable d'avancement de la rupture et de définir une décomposition triple de cette phase du cycle (Cao et al. 2012).

Remerciements :

L'auteur remercie S. Maurel, I. Cossadia, M. Voisine, Y. Cao et L. Thomas pour leurs contributions. Il a bénéficié d'une longue collaboration avec Renault S.A. et souhaite en remercier les interlocuteurs (A. Dupont, P. Dumont, P. Rey, S. Guilain).

Bibliographie :

- [1] Alharbi, A. Y. and V. Sick (2010). "Investigation of boundary layers in internal combustion engines using a hybrid algorithm of high speed micro-PIV and PTV." Exp. in Fluids 49(4): 949-959.
- [2] Arcoumanis, C., Z. Hu and J. H. Whitelaw (1990). "Tumbling motion: a mechanism for turbulence enhancement in spark-ignition engines." SAE paper 900060.
- [3] Borée, J. (2003). "Extended proper orthogonal decomposition: a tool to analyse correlated events in turbulent flows." Exp. in Fluids 35: 188-192.
- [4] Boree, J., D. Marc, R. Bazile and B. Lecordier (1999). "On the behaviour of a large scale tumbling vortex flow submitted to a compression." European Series in Applied and Industrial Mathematics ESAIM Proceedings : <http://www.emath.fr/Maths/Proc> Vol. 7.
- [5] Borée, J., S. Maurel and R. Bazile (2002). "Disruption of a compressed vortex." Phys. Fluids (Prof. J. Lumley 70th birthday Symp. Papers) Vol. 14, Issue 7: pp. 2543-2556.
- [6] Cao, Y., L. Thomas, J. Borée and S. Guilain (2012). Estimation of cycle to cycle variations for in-cylinder tumbling flows. 16th International Symposium on applications of Laser techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, July.
- [7] Cosadia, I., J. Borée, G. Charnay and P. Dumont (2006). "Cyclic variations of the swirling flow in a Diesel transparent engine." Exp. in Fluids 41 n°1: 115-134.
- [8] Dannemann, J., K. Pielhop, M. Klass and W. Schröder (2010). "Cycle resolved multi-planar flow measurements in a four valve combustion engine." Exp. in Fluids 50, 4: 961-976.
- [9] Fogleman, M., D. Rempfer, J. L. Lumley and D. Haworth (2004). "Analysis of tumble breakdown in IC engine flows using the POD." Journal of Turbulence 5: 023(<http://jot.iop.org/>).
- [10] Fogleman, M. A. (2005). Low dimensionnal models of internal combustion engine flows using the proper orthogonal decomposition, PhD Thesis, Cornell University.
- [11] Granet, V., O. Vermorel, C. Lacour, B. Enaux, V. Dugué and T. Poinot (2012). "Large-eddy simulation and experimental study of cycle-to-cycle variations of stable and unstable operating points in a spark ignition engine." Comb. Flame 159: 1562-1575.
- [12] Haller, G. (2002). "Lagrangian coherent structures from approximate velocity data." Physics of Fluids 14, N°6: 1851-1862.
- [13] Hasse, C., V. Sohm and B. Durst (2009). "Detached eddy simulation of cyclic large scale fluctuations in a simplified engine set-up." Int. J. Heat Fluid Flow 30(1): 32-43.
- [14] Hasse, C., V. Sohm and B. Durst (2010). "Numerical investigation of cyclic variations in gasoline engines using a hybrid URANS/LES modeling approach." Computers & Fluids 39: 25-48.
- [15] Haworth, D. C. and K. Jansen (2000). "Large eddy simulation on unstructured deforming meshes: Towards reciprocating IC engines." Computers and Fluids 29: 493-524.
- [16] Hekmati, A., D. Ricot and P. Druault (2011). "About the convergence of POD and EPOD modes computed from CFD simulation." Computers and Fluids: 39-52.
- [17] Hill, P. G. and D. Zhang (1994). "The effects of swirl and tumble on combustion in spark-ignition engines." Prog. Energy Combust. Sci. 20: 373-429.
- [18] Kapitsa, L., O. Imberdis, H. P. Bensler, J. Willand and D. Thévenin (2010). "An experimental analysis of the turbulent structures generated by the intake port of a DISI-engine." Exp. in Fluids 48: 265 - 280.
- [19] Keromnes, A., C. Dujol and P. Guibert (2010). "Aerodynamic control inside an internal combustion engine." Meas. Sci. Technol. 21.
- [20] Lumley, J. L. (1999). Engines. An introduction, Cambridge University Press.
- [21] Lumley, J. L. (2001). "Early work on fluid mechanics in the IC engine." Ann. Rev. Fluid Mech. 33: 319-338.
- [22] Lundgren, T. S. and N. N. Mansour (1996). "Transition to turbulence in an elliptic vortex." J. Fluid Mech. 307: 43-62.
- [23] Maurel, S., J. Borée and J. L. Lumley (2001). "Extended proper orthogonal decomposition : Application to jet/vortex interaction." Journal of Flow, Turbulence and Combustion 67: 125-136.
- [24] Müller, S., S. Arndt and A. Dreizler (2011). "Analysis of the in-cylinder flow field / spray injection interaction within a DISI IC engine using high speed PIV." SAE Technical Paper 2011-01-1288.
- [25] Müller, S., B. Böhm, M. Gleissner, R. Grzeszik, S. Arndt and A. Dreizler (2010). "Flow field measurements in an optically accessible direct injection spray-guided internal combustion engine using high speed PIV." Exp. in Fluids 48: 281-290.
- [26] Reuss, D. L., T. W. Kuo, B. Khalighi, D. Haworth and M. Rosalik (1995). "Particle image velocimetry measurements in a high-swirl engine used for evaluation of computational fluid dynamics calculations." SAE Paper 952381.
- [27] Ruiz, T., J. Borée, T. Tran, C. Sicot and L. E. Brizzi (2010). "Finite Time Lagrangian analysis of an unsteady separation using high speed Particle Image Velocimetry." Physics of Fluids 22, 075103: 1,9.
- [28] Shadden, S. C., J. O. Dabiri and J. E. Marsden (2006). "Lagrangian analysis of fluid transport in empirical vortex ring flows." Phys. of Fluids 18 - 4.

- [29] Vermorel, O., S. Richard, O. Colin, C. Angelberger, A. Benkenida and D. Veynante (2009). "Towards the understanding of cyclic variability in a spark ignited engine using multi-cycle LES." *Comb. Flame* 156: 1525-1541.
- [30] Voisine, M., L. Thomas, J. Borée and P. Rey (2011). "Spatio-temporal structure and cycle to cycle variations of an in-cylinder tumbling flow." *Exp. in Fluids* 50: 1393-1407.