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

J. BOREE

Institut Pprime, UPR 3346 CNRS, ENSMA, Université de Poitiers, France.

Workshop sur le Traitement des données massives en Mécanique des Fluides (TDMF)
29 novembre - 1er décembre 2017, Bâtiment Claude Shannon, LRI, Orsay

Remerciements

Contributions de :

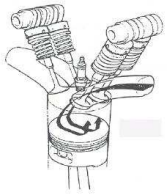
Etudiants Thèse: M. Voisine, Y. Cao
T. Ruiz, S. Maurel, I. Cossadia, S. Depardon, E. Kaiser

Collègues: ***L. Thomas***
R. Perrin, C. Sicot, L.E. Brizzi, J. Delville, L. Cordier, B. Noack

Ingénieurs Renault SA: *P. Rey, S. Guilain, P. Dumont, A. Dupont*

Support Financier: *ENSMA ;*
Renault S.A. ;
ANR

Introduction



Introduction

Banc d'essai Renault – Techniques de mesure
Admission : Structure et Variabilité de l'écoulement
Interaction écoulement/paroi pendant la phase de compression
Déstabilisation du rouleau et CCV
Conclusion

Introduction

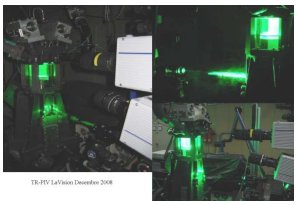
- **Une large gamme d'écoulements internes en moteur à Piston.**
  - Ont un impact prononcé sur les **performances** et les **émissions polluantes**.
  - Resteront pour longtemps des éléments clés de la motorisation – par exemple Hybride – soumis à de fortes contraintes.
- **Points clés : Maîtrise de la variabilité Cycle à Cycle / Robustesse**
  - Variabilité cycle à cycle à grande échelle (cruciale pour le downsizing)
  - Idéalement : Maîtrise de l'écoulement turbulent (grandes échelles et fluctuation), de sa composition au voisinage de la bougie lors de l'allumage.
  - Modélisation / Compréhension
- **De nombreux travaux de recherche récents :**
  - Méthodologies expérimentales et numériques nouvelles
    - HS-PIV ; Mesures Couplées concentration/vitesse
    - L.E.S. or Hybrid RANS/LES
  - Nouvelles méthodes d'analyse des cohérences spatio-temporelles

Introduction

- **L'analyse de grands ensembles de données est un défi en soi**
- **En écoulement moteur ou pour une large classe d'aérodynamiques internes ou externes, on recherche :**
  - (i) des évènements clés, 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 informations pour la modélisation de la turbulence: définition de décompositions triples et test rigoureux des fermetures associées.
  - (iv) des informations pour de nouvelles voies de modélisations : modélisation réduite ou analyse probabiliste (Cluster).
- **But de l'exposé: Autour de l'exemple d'un écoulement de rouleau :**
  - Mise en parallèle des propriétés physiques de l'aérodynamique turbulente en moteur avec l'ensemble des techniques d'analyse utilisées.

INSTITUT P' FTC

Banc d'essai Renault – Techniques de mesure

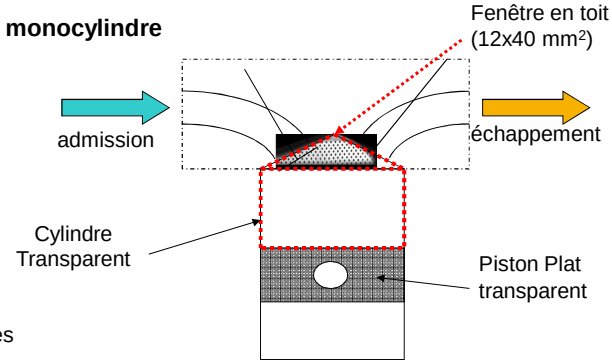


Introduction
Banc d'essai Renault – Techniques de mesure
Admission : Structure et Variabilité de l'écoulement
Interaction écoulement/paroi pendant la phase de compression
Déstabilisation du rouleau et CCV
Conclusion

INSTITUT P' FTC

Banc d'essai Renault – Techniques de mesure

- **Moteur « transparent » monocylindre**



- Moteur quatre soupapes
- Angle toit : 28°
- Régime1200 rpm
- Admission: pression atmosphérique
- Pmax au PMH : 18 bars
- Taux de Rouleau ≈ 1

Banc d'essai Renault – Techniques de mesure

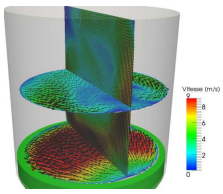
- **Système PIV - Dantec**
  - Laser YAG (100 mJ/pulse, f_L = 10 Hz, épaisseur ≈ 1 mm)
    - Un champ PIV par cycle moteur
  - Caméra PIV Flowsense 1600*1200 pixels
  - Statistiques basées sur 500 champs de vitesse, (fenêtre d'interrogation ≈ 2.5mm),

- **HS-PIV – système LaVision**
  - Laser Litron LDY303 (10 mJ/pulse, f_L = 1.8 kHz, épaisseur <1 mm)
  - Caméra CMOS HSS6 1024*1024 pixels
  - Fenêtres d'interrogation ≈ 2.mm.

- **Traceurs solides (Φ ≈1,2µm ; $\tau_p \approx 3.\ 10^{-4}$ s) ou liquides (Φ ≈1µm ; $\tau_p \approx 10^{-4}$ s)**

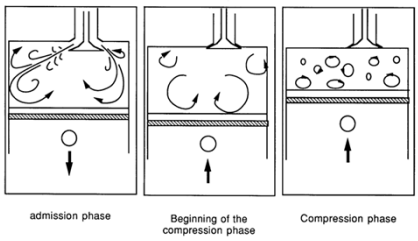
- **Traitement :**
  - Corrections des distorsions d'images si nécessaire (Soloff, Meas. Sci. Tech. 1997)
  - Soustraction d'une moyenne glissante du fond pour « éliminer » les réflexions (plans verticaux) .
  - Cross corrélation adaptative 32*32pixels 50% superposition
  - Vecteurs faux (PIV : <1% ; HS PIV : ≈5% identifiés et remplacés par filtrage médian.

Admission : Structure et Variabilité de l'écoulement



Introduction
Banc d'essai Renault – Techniques de mesure
Admission : Structure et Variabilité de l'écoulement
Interaction écoulement/paroi pendant la phase de compression
Déstabilisation du rouleau et CCV
Conclusion

Turbulence : Propriétés fondamentales en l'absence d'écoulements Ordonnés



- **Flux d'énergie cinétique pendant l'admission (Lumley 1999) :**
- **Au milieu de l'admission :**

$$\Rightarrow \; u \approx 10\overline{V}_p \;\text{ et }\; l \approx b/6$$

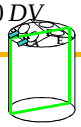
- *Valeurs typiques : Vp≈5m/s, b≈80mm*

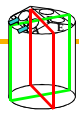
- **Nombre de Reynolds turbulent très élevé (Typiquement R_t> 50000)**
- **Un mélange très efficace (δ ≈ b/2 pendant ≈ 15% de la course du piston)**
- **Une dissipation intense :**

$$\frac{[\text{Temps de déclin}]}{[\text{Période Moteur}]} \approx \frac{l/u}{1/N} \approx \frac{1}{120} \Leftrightarrow \text{Fin Admission} : u \approx \overline{V}_p$$

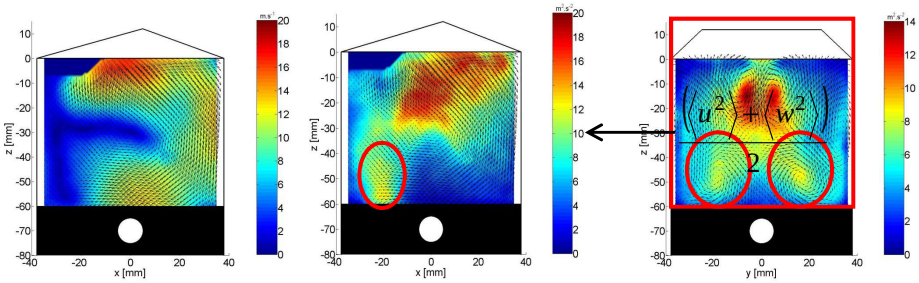
- **Justifie l'utilisation de mouvement ordonnés pour « stocker » l'énergie cinétique**

Phase d'admission $\theta = 120\ DV$





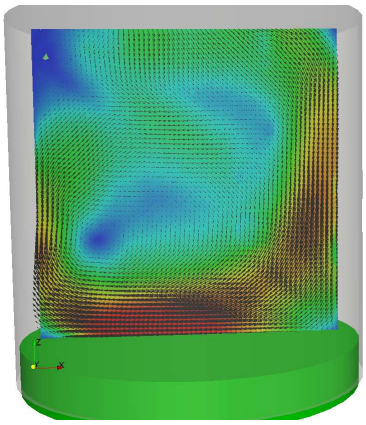
- **Plan rouleau**
  - Vitesse moyenne et variance
- **Plan orthogonal**
  - Variance

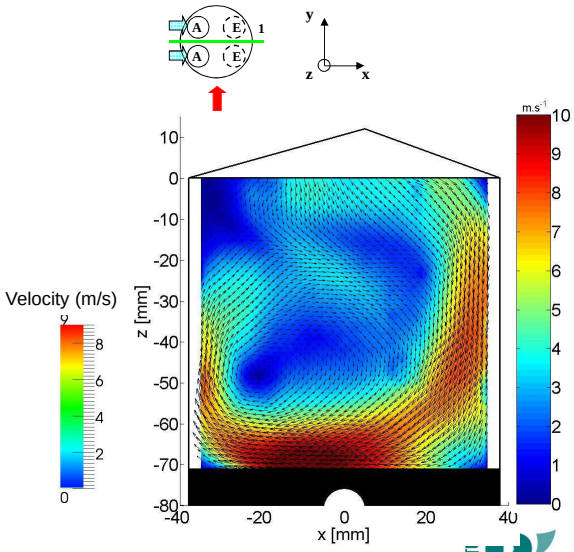


- **Deux jets de soupape interagissant avec le piston en mouvement.**
  - Front d'énergie cinétique turbulente en tête de jet
- **Plan orthogonal : une remontée le long des parois du cylindre**
  - Fluctuations significatives dans ces régions

Structure moyenne au PMB

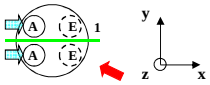
- **Vitesse moyenne**

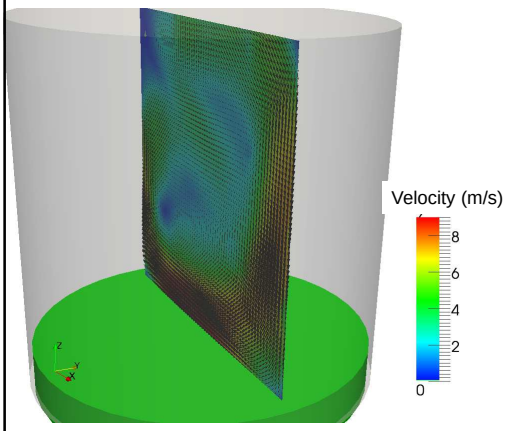




Structure moyenne au PMB

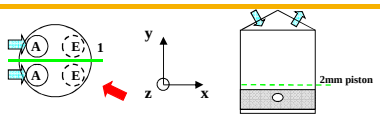
- **Vitesse moyenne**

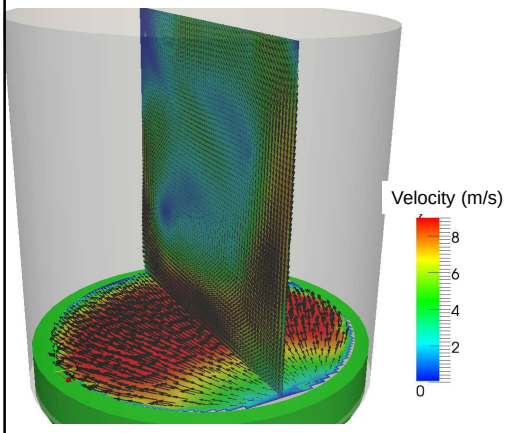


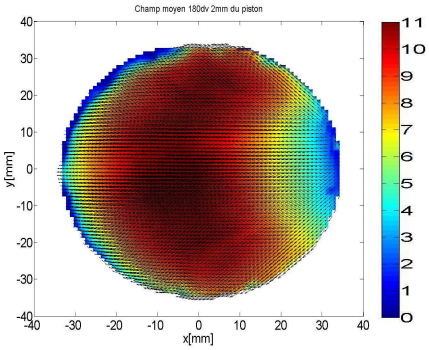


Structure moyenne au PMB

- **Vitesse moyenne**

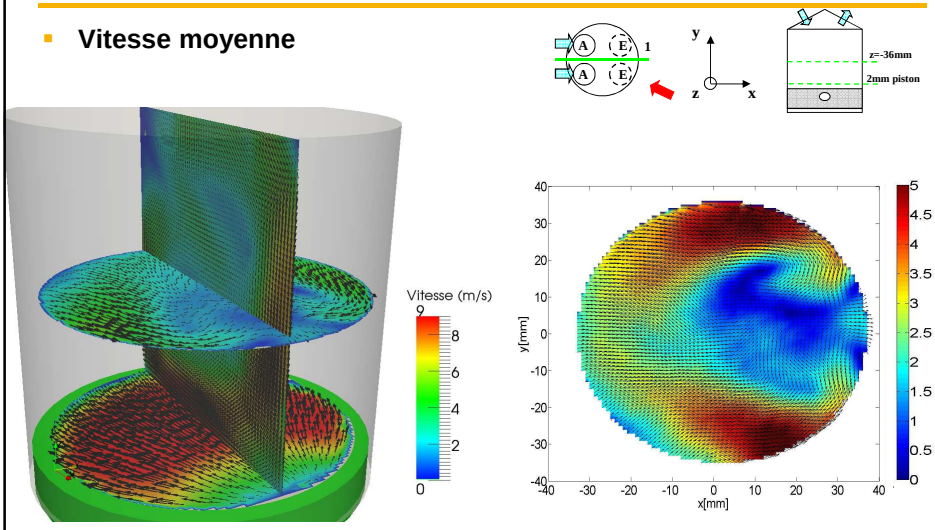






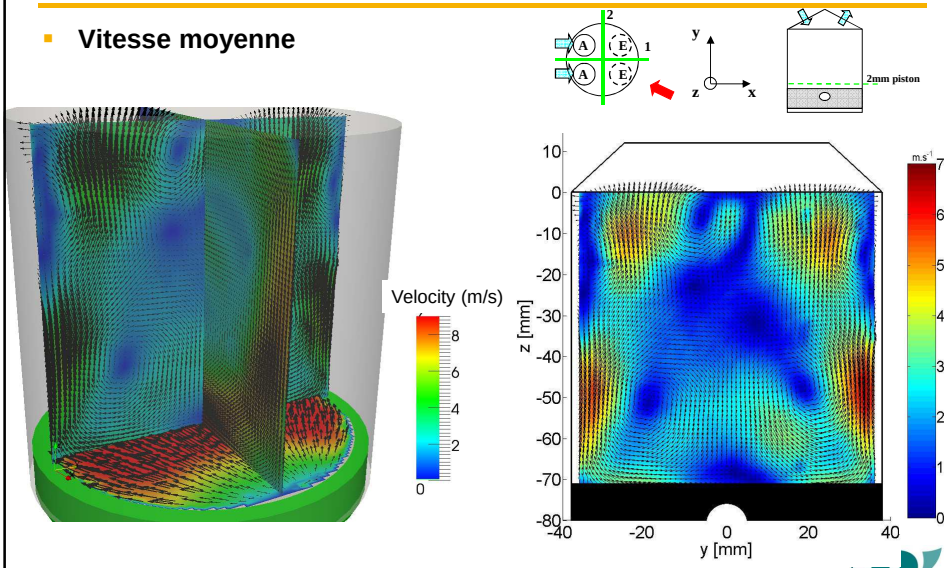
Structure moyenne au PMB

- **Vitesse moyenne**



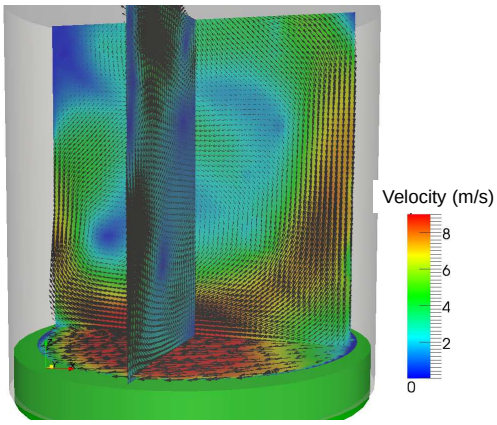
Structure moyenne au PMB

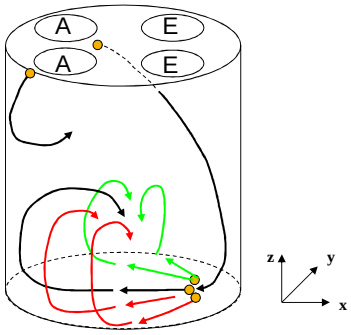
- **Vitesse moyenne**



Structure moyenne au PMB

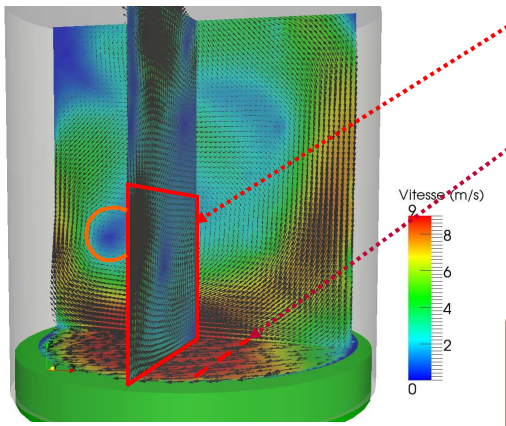
- **Pilotée par l'impact des jets de soupape sur le piston plat**
  - Interactions avec les parois du cylindre et enroulement du jet pour former un mouvement de rouleau





Variations cycle à cycle au PMB

- **Indicateurs intégraux**



- **Circulation Γ**
  - **$\sigma_\Gamma \approx 30\%$**
  - **Pas de corrélation entre les deux cotés**
- **Flux de qté de mvt: rms ≈15%**
- **E POD** ***(Maurel, Borée, Lumley FTC 2001)***
  - **« Centre du foyer » ↔ intensité du jet**

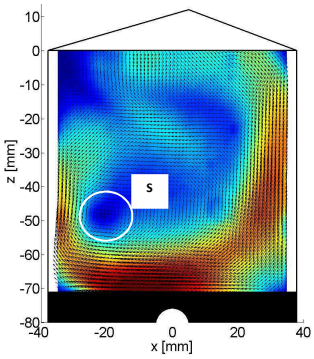
1 - Calcul POD dans un sous-domaine (zone foyer: peu d'énergie)

2 – Analyse des interactions entre zone jet et zone foyer

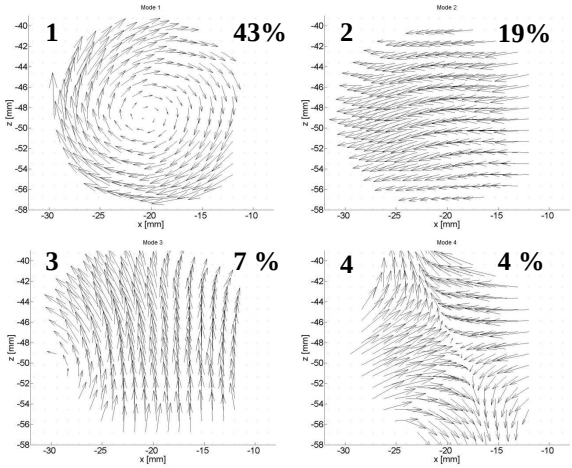
Variations cycle à cycle au PMB

Modes POD

- **Région S : Foyer**

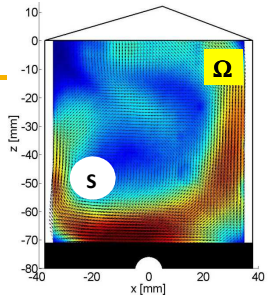


Voisine, 2010



- **Contribution importante des CCV à la localisation du foyer**
- **Contribution dominante le long de la paroi cylindre**

Définition des modes étendus



- **Mode étendu** *« (n) »* **pour la vitesse dans Ω–S défini par** *(Borée Exp. In Fluids 2003)*

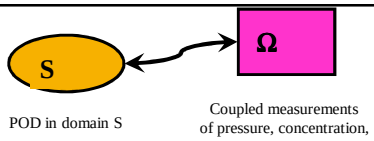
$$\Psi_\alpha^{(n)}(\mathbf{X}') = \frac{\left\langle a_k^{(n)} \mathbf{U}_k(\mathbf{X}') \right\rangle}{\lambda^{(n)}} \qquad \text{avec} \quad \mathbf{X}' \in \Omega - S$$

  - $a_k^{(n)}$ coefficient aléatoire de la décomposition POD de $\mathbf{U}_k$ **dans S.**
  - ***U à l'extérieur est projeté sur la base temporelle*** $a_k^{(n)}$

- **Décomposition adoptée :** $\mathbf{U}_{Ck}(\mathbf{X}') = \sum_N a_k^{(n)} \Psi_\alpha^{(n)}(\mathbf{X}')$

- **U_C est la seule partie de la vitesse à l'extérieur spatialement corrélée avec U dans S.**
  - U_C est décomposé en "N_{mode}" , corrélés un à un à la projection de U sur un mode POD dans S.

Propriétés des modes étendus



- **U_C est strictement égal à la LSE du signal dans Ω sachant U.**
  - Mais **U** peut maintenant être filtré avec la POD avant la LSE.

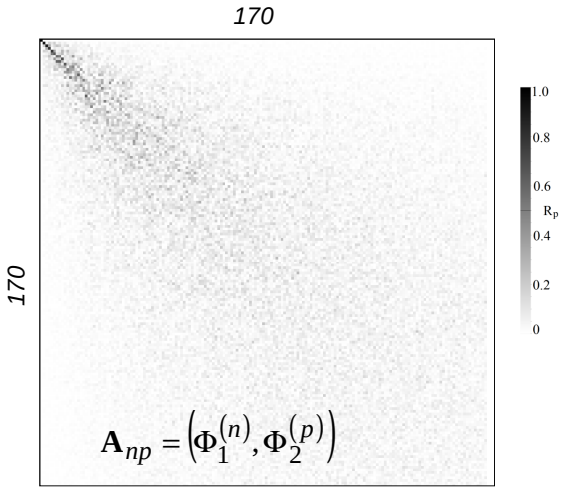
- **Pour un calcul POD direct: $N_{mod} << N_t$**
  - La définition des parties corrélée et décorrélée est objective car une bonne convergence statistique peut être atteinte.

- **Pour un calcul "Snapshot POD" : $N_{mod} = N_t$**
  - N'utliser que les modes représentatifs (convergés !!) pour définir U_C
  - Démonstration par Hekmati, et Al. Comp. and Fluids 2011 :
    $U_C = U$ (!!!) quelle que soit la situation car $N_{mod} = N_t$ et tout champ de vecteur de dimension N_t peut être projeté sur la base $a_k^{(n)}$.

A. Hekmati, D. Ricot and P. Druault, About the convergence of POD and EPOD modes computed from CFD simulation. Computers and Fluids (2011)

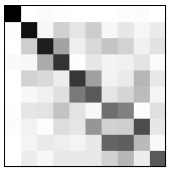
POD : A propos de convergence statistique :

- **Un exemple: deux sets de 170 champs indépendants extraits de 237 champs de richesse.** *Merci à Hao, Sick, Reuss*



Test de convergence important pour l'analyse POD

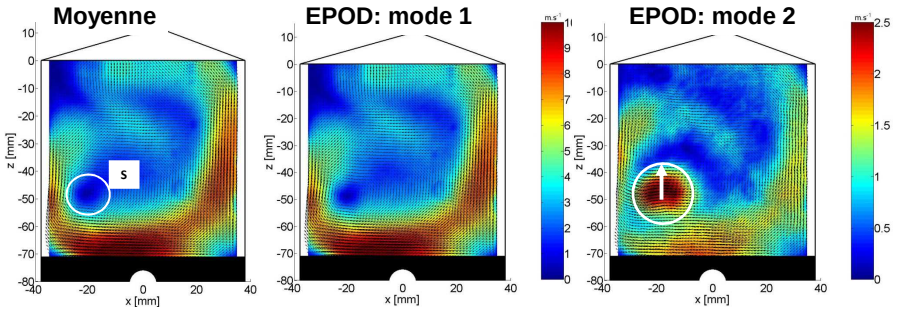
Zoom sur les 1er
10 par 10 modes



Variations cycle à cycle au PMB

$$\Psi_{\alpha}^{(n)}(\mathbf{X}') = \frac{\left\langle a_k^{(n)} \alpha_k(\mathbf{X}') \right\rangle}{\lambda^{(n)}}$$

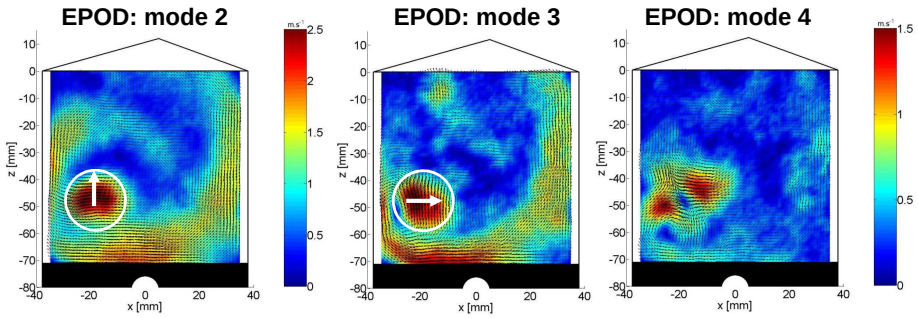
- **POD Foyer ↔ EPOD Cylindre :**



- **Corrélation forte**
- **Position du foyer corrélé clairement à l'intensité du jet et de l'enroulement.**

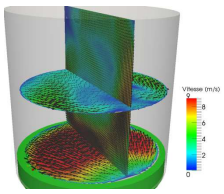
Variations cycle à cycle au PMB

- **POD Foyer ↔ EPOD Cylindre :**



- **Une corrélation à grande échelle pour le déplacement du foyer seulement.**

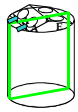
Interaction écoulement/paroi pendant la phase de compression

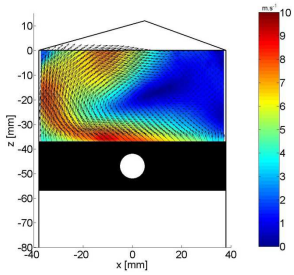


Introduction
Banc d'essai Renault – Techniques de mesure
Admission : Structure et Variabilité de l'écoulement
Interaction écoulement/paroi pendant la phase de compression
Déstabilisation du rouleau et CCV
Conclusion

Début de la phase de compression

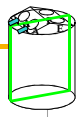
- **Fermeture des soupapes d'admission**
- **Structuration de chaque rouleau induite par les propriétés du jet d'admission DANS LE CYCLE.**
- **Indicateurs spatio-temporels de la propagation du jet.**
  - Utilisation de la HS-PIV et des méthodologies Lagrangiennes



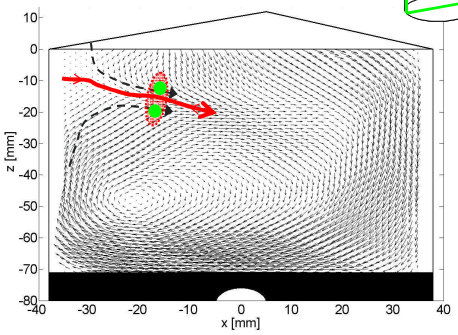


$\theta = 270\,\mathrm{CAD}$

Indicateurs spatio-temporels de la propagation du jet



Plan du rouleau



- **L'enroulement du rouleau se traduit par un point de décollement instationnaire**
- **Ejection de fluide depuis la proximité de la paroi**
- **Elément essentiel pour :**
  - La structuration interne de l'écoulement de rouleau
  - Le mélange ultérieur
- **Un point dur pour la modélisation**
  - Aucun calcul (RANS, Hybride ou LES) supposant un état d'équilibre des couches limites (lois de parois) n'est valable. *(Borée & Miles 2013)*

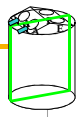
Couches limites en écoulement moteur : Equilibre ?

- **Echelles caractéristiques :** $u_\tau = \sqrt{\tau_p / \rho}$ et $\delta_\nu = \nu / u_\tau$
- **Estimation en moteur :** $u_\tau \approx (R_T / 20)\overline{V}_p$
  (Lumley 1999, Borée & Miles 2013)
- **En sous couche visqueuse :** $\delta_\nu / b << 1$ et $N\,\delta_\nu^{\,2} / \nu << 1$
  - Le transfert de quantité de mouvement est quasi-statique et dominé par la diffusion
- **Plus loin de la paroi (typiquement y_1=b/100 ou y_1^+>30)**
  - Valeurs typiques pour des maillages standard (zone « Log »)

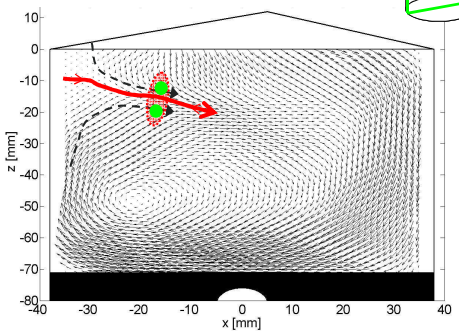
$$\frac{[\tau_1 = \kappa y_1 / u_\tau]}{[\text{Tps de retournement du rouleau}]} \approx 1 \text{ et } \frac{[\tau_1 = \kappa y_1 / u_\tau]}{[\tau_t = l/u]} \approx 1$$

- **Aucun calcul (RANS, Hybride ou LES) supposant un état d'équilibre des couches limites (lois de parois) n'est valable**

Indicateurs spatio-temporels de la propagation du jet



Plan du rouleau



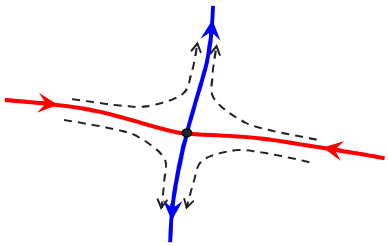
- **Ejection de fluide depuis la proximité de la paroi**
- **La structure topologique est un point selle**

➡ **Mais dans un référentiel en déplacement le long de la paroi à la vitesse du jet formant le rouleau !**

Indicateurs spatio-temporels de la propagation du jet

- **Choix : mettre en évidence cette variété instable dans la région de proche paroi en utilisant les "Exposants de Lyapounov à temps fini" (FTLE)**

Etirement maximum pour T<0



Etirement maximum pour T>0

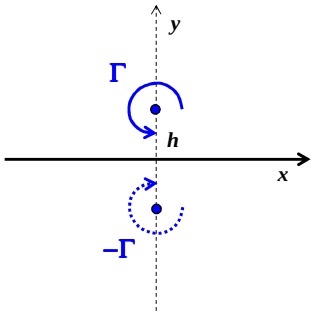
Point selle stationnaire

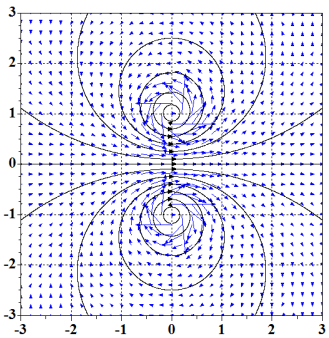
- **Finite Time Lyapounov Exponents**
  (Haller Phys. D 2001)
  - Integration temporelle à l'horizon T $\mathbf{x}(t_0+T;t_0,\mathbf{x_0})$
  - Tenseur de déformation de Cauchy-Green $\mathbf{A^TA}$ où $\mathbf{A}= \nabla_{x0}\mathbf{x}(t_0+T;t_0,\mathbf{x}_0)$
  - Dispersion maximale associée à la plus grande valeur propre de $\mathbf{A^TA}$

$$\Rightarrow \sqrt{\lambda_{\max}} \quad \text{où} \quad \sigma_{t0}^{T}(\mathbf{x_0}) = \frac{1}{|T|} Ln\sqrt{\lambda_{\max}}$$

Indicateurs spatio-temporels de la propagation du jet

- **Exemple analytique simple : Tourbillon de Lamb Oseen et son image** ***(Mastère T. Tran T.)***





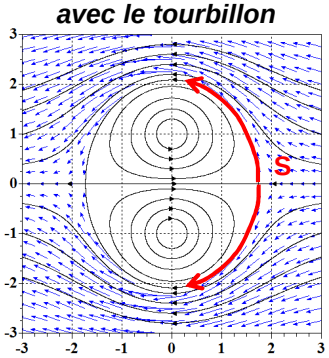
Variables sans dimension :
$x^*=x/h$
$v^* = v/(\Gamma/h)$
$T^*=t/(h^2/\Gamma)$

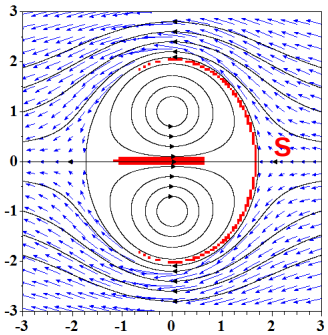
- Champ de vitesse instantané
- Déplacement à la vitesse constante : $U = \frac{\Gamma}{4\pi h} \Leftrightarrow U^* = \frac{1}{4\pi}$

$\Rightarrow$ Instationnarité v(x,t)

Indicateurs spatio-temporels de la propagation du jet

Dans le référentiel en déplacement avec le tourbillon



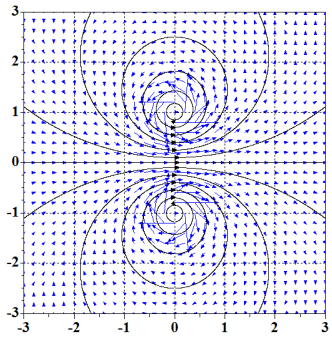


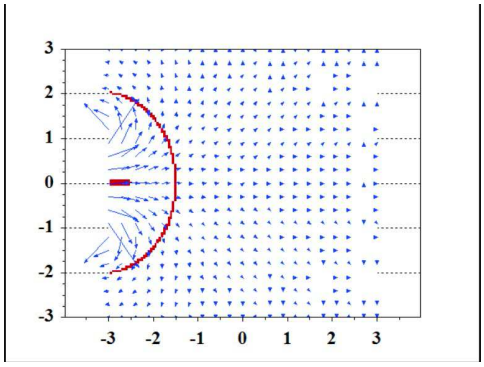
- **Champ stationnaire v(x,~~t~~)**
- **2 points selle & 2 foyers**

- **Crêtes des FTLE avecT*= -40**
- **seuls σ/σ_{max}> 0,9 montré ici**

Indicateurs spatio-temporels de la propagation du jet

- **Les FTLE sont invariants par transformation Galiléenne**

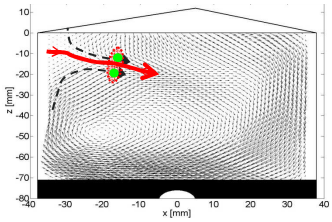




- **Extension naturelle de l'analyse topologique aux écoulements instationnaires.**

Indicateurs spatio-temporels de la propagation du jet

- **Application à l'écoulement moteur :**
  - Eclt 3D turbulent !
  - Utilisation de données 2D-2C HS-PIV dans le "plan rouleau"
  - Pas de données PIV proches paroi
    - Interpolation "miroir" en proche paroi
    - Modèle avec glissement *(Lekien & Haller PoF 2008)*



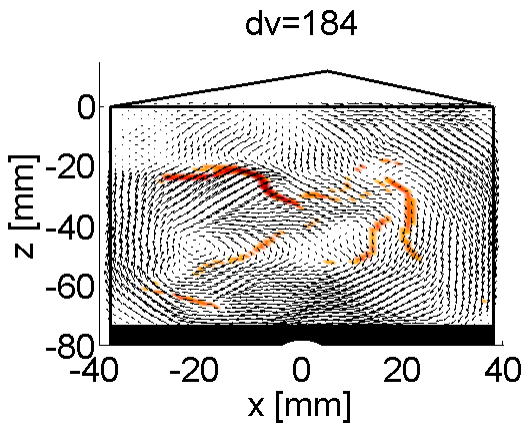
  - Choix d'un temps d'intégration long : T=-6,1ms (-44 cad)

- **Utilisation de données HS-PIV**
  - Résolution en DV : 4dv (fe=1800Hz)
  - 38 cycles consécutifs

Indicateurs spatio-temporels de la propagation du jet

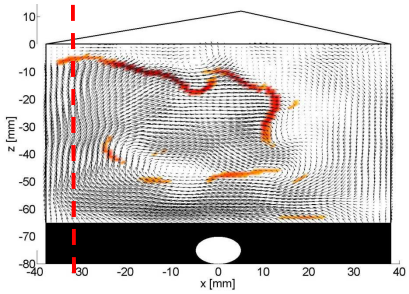
- **Cycle 30: Crêtes FTLE et dépl. dans le cycle de l'éjection de fluide**

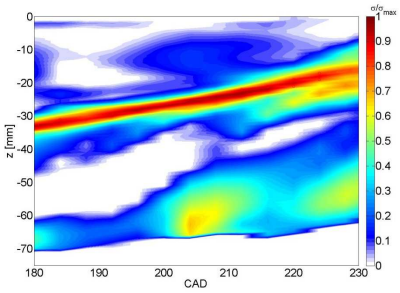
$\sigma_{t_0}^{T} > 0{,}8$



Indicateurs spatio-temporels de la propagation du jet

- **Analyse quantitative :**
  - Pour chaque DV : Coupe verticale du champ FTLE (Δx≈7mm)
  - Tracé spatio-temporel pour chaque cycle

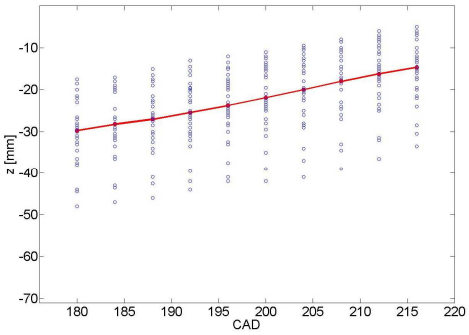




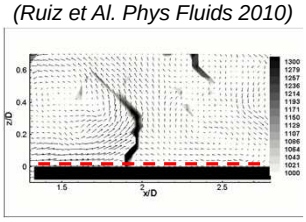
- **Position de l'éjection de fluide à chaque DV**
  - Variations cycle à cycle associées ?

Indicateurs spatio-temporels de la propagation du jet

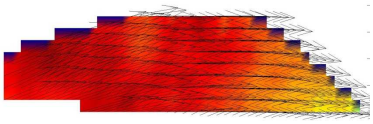
- **Position de l'éjection pour chaque cycle**
- **CCV importante (approx. 10% de la course piston)**
- **Fortement corrélé au CCV du taux de rouleau.**
- ***Un outil puissant pour l'analyse et la comparaison aux prédictions numériques.***



(Ruiz et Al. Phys Fluids 2010)



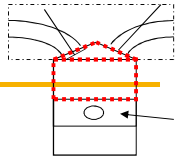
Déstabilisation du rouleau et CCV



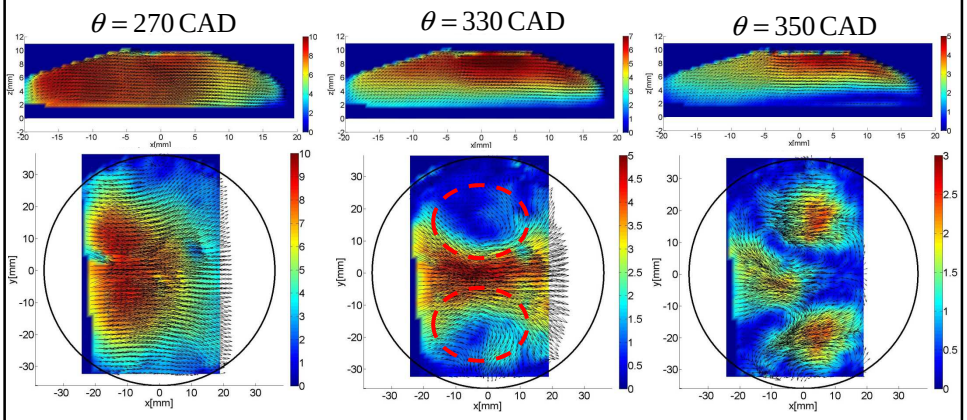
Introduction
Banc d'essai Renault – Techniques de mesure
Admission : Structure et Variabilité de l'écoulement
Interaction écoulement/paroi pendant la phase de compression
Déstabilisation du rouleau et CCV
Conclusion

INSTITUT P' FTC

Phase de rupture



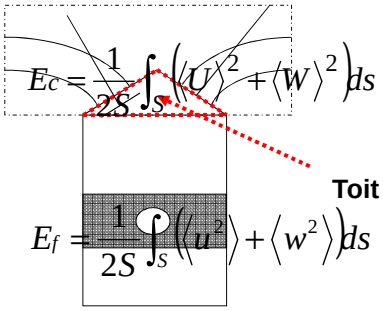
- **Vitesse moyenne**

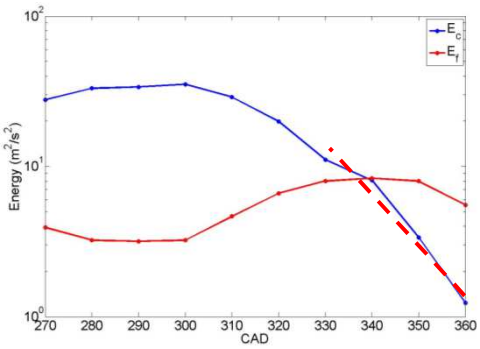


- **Une décroissance significative de l'énergie cinétique du champ moyen.**

Phase de rupture

- **Analyse RANS : Evolution des Ec moyenne et fluctuante**

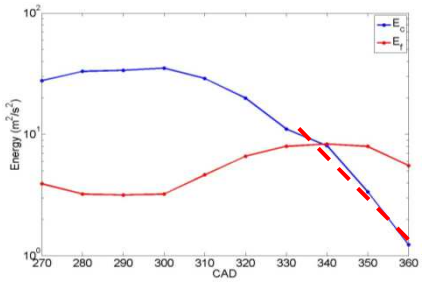




- **Déclin exponentiel clair de l'Ec du champ moyen**
  - $\tau_d \approx 2$ *ms* $\leftrightarrow$ Approx. égal au temps de retournement du rouleau

Phase de rupture

- **Evolution des Ec moyenne et fluctuante**

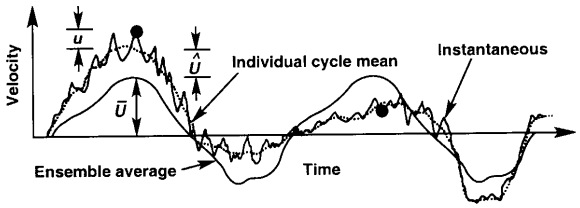


- **Transfert vers une turbulence à fine échelle** *(Lundgren & Mansour JFM 96 ; Lumley ARFM 2001)* **?**

- **Ou amplification d'une variabilité cycle à cycle grande échelle en phase de déstabilisation ?**

Phase de rupture

- **Problème classique de la « séparation » de composantes du mouvement avant des contributions différentes**



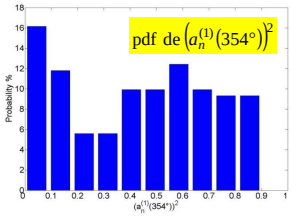
(Heywood 1988)

  - Echec des méthodes de filtrage spatial ou temporel.
  - Noter le développement récent de l'Empirical Mode Decomposition *(M. Sadeghi – 2017 Thèse Lab. PRISME, Foucher et Al. Exp in Fluids)*

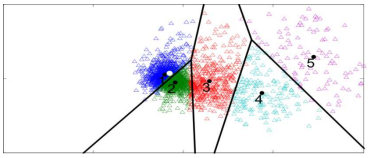
- **Prise en compte d'une différence de cohérence spatio-temporelle ??**

Phase de rupture : Deux voies d'approches présentées ici

POD invariante en phase
(Fogleman et Al, 2004 – Cosadia et Al, 2006)



Cluster based analysis
(Cao et Al – Exp Fluids 2014
Kaiser et Al. JFM 2014)



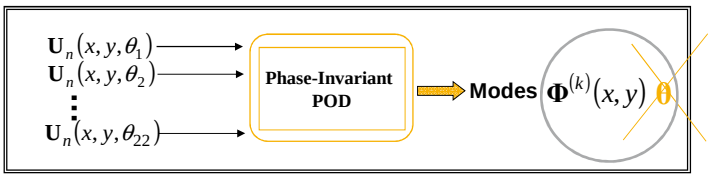
Phase de rupture : Analyse par POD invariante en phase

- **POD invariante en phase** *(Fogleman et Al, 2004 – Cosadia et Al, 2006)* **de données HS-PIV.**

Une base commune pour 161 cycles et 22 CAD de 270 à 354 CAD

- **Champs normalisés (*énergie cinétique = 1*)**

Mise en évidence de la structure spatio-temporelle.



Phase de rupture : Analyse par POD invariante en phase

- **Fonctions propres spatiales :** $\mathbf{\Phi^{(k)}}(x, y)$
- **Valeurs propres (positives) :** $\Lambda^{(k)}$
- **Coefficients de projection :**

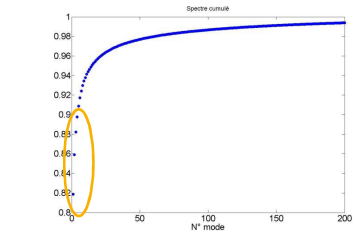
$$\mathbf{v_n}(x, y, \theta_m) = \frac{\mathbf{U_n}(x, y, \theta_m)}{\sqrt{E_n}} \qquad a_n^{(k)}(\theta_m) = \left(\mathbf{v_n}(x, y, \theta_m), \mathbf{\Phi^{(k)}}(x, y)\right)$$

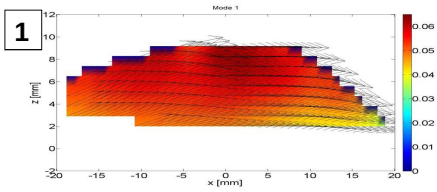
phase

Coefficient aléatoire — Mode spatial

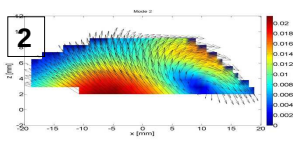
- **Valeurs propres phasées :** $\lambda^{(k)}(\theta) = \left\langle \left(a_n^{(k)}(\theta)\, a_n^{(k)}(\theta)\right)\right\rangle = \frac{1}{M}\sum_{n=1}^{M}\left(a_n^{(k)}(\theta)\right)^2$
- **Normalisation :** $\sum_{k=1}^{N}\left(a_n^{(k)}(\theta)\right)^2 = 1$ et $\sum_{k=1}^{N}\lambda^{(k)}(\theta) = 1$

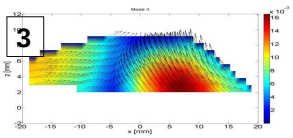
Phase de rupture : Analyse par POD invariante en phase

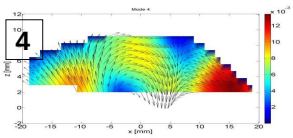




- **Informations globales**
  - **4 modes : 90% de l' "énergie"**
  - **Mode 1 : Ecoulement principal le long de la culasse.**
  - **Toute combinaison linéaire de modes plus élevés : structures complexes (vitesses verticales)**

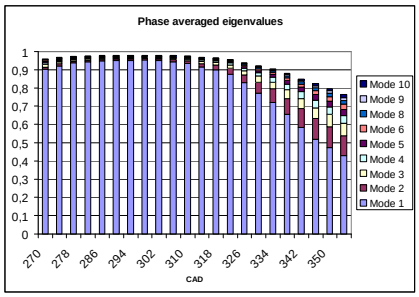


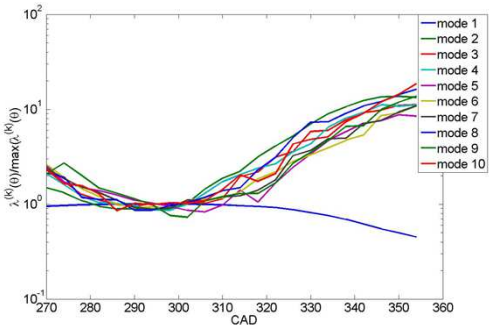




Phase de rupture : Analyse par POD invariante en phase

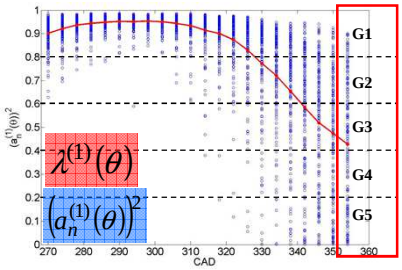
- **Evolution des valeurs propres phasées :** $\lambda^{(k)}(\theta)$

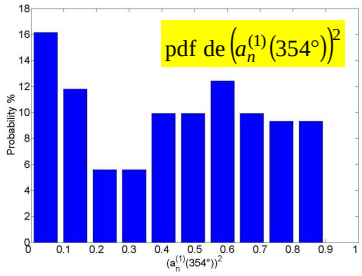




- **Très grande convergence avant 300 DV**
- **Les modes élevés « explosent » pendant la rupture**
  - Approximativement le même taux de croissance exponentiel.

Phase de rupture : Analyse par POD invariante en phase

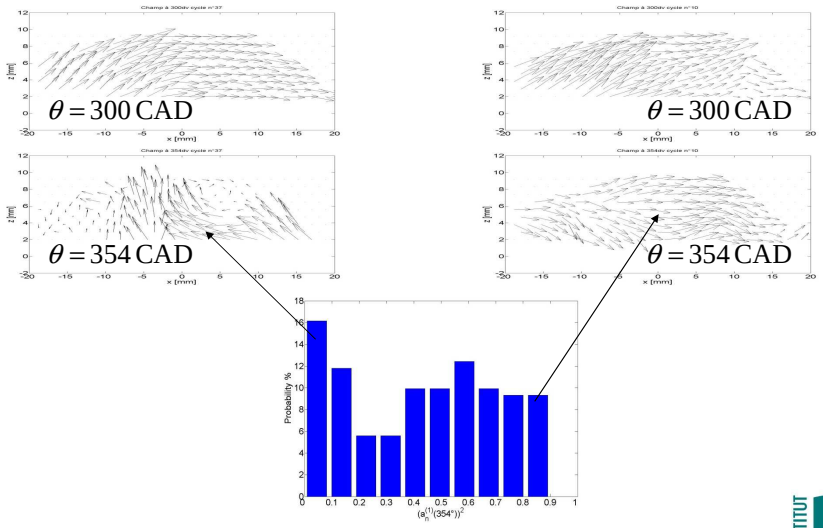




- **Premier mode POD seul + tracé de toutes les réalisations du coefficient de projection associé :**
  - Question : Tous les champs se projettent ils bien sur le mode 1 ?
  - Réponse : Non, Très large dispersion pendant la rupture
- **Définition de « groupes » basés sur l'état de l'écoulement au PMH**

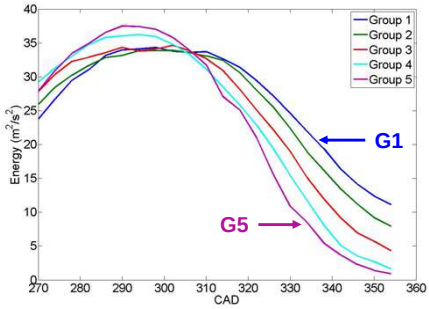
Phase de rupture : Analyse par POD invariante en phase

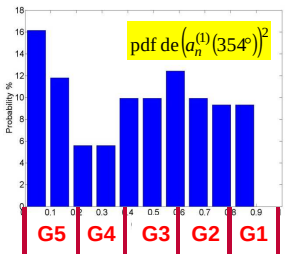
- **Exemple de deux cycles particuliers à 300 et 354 DV**



Phase de rupture : Analyse par POD invariante en phase

- **Evolution de l'énergie cinétique du champ moyen dans chaque groupe (analyse conditionnelle).**
  - Approximativement 30 champs par groupe.

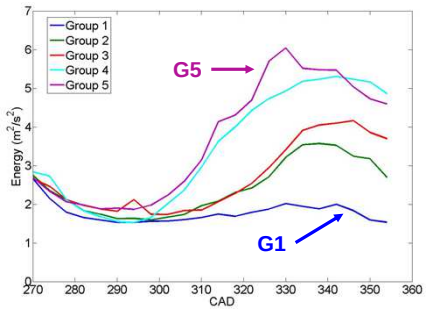


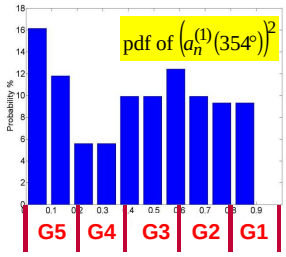


  - Déclin rapide pour les cycles perdant leur cohérence à grande échelle.
  - Corrélation entre structure au PMH et Ec maximale : R=0,25

Phase de rupture : Analyse par POD invariante en phase

- **Evolution de l'Ec fluctuante dans chaque groupe.**
  - Approximativement 30 champs par groupe.





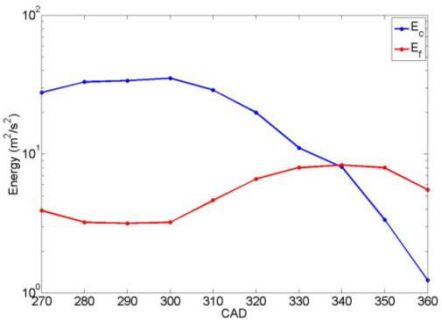
- **Croissance plus forte de l'Ec fluctuante pour G5 et G4**
  - Rupture précoce pour G5 : plus de temps pour la dissipation de l'Ec ?
- **Pas de maximum détecté pour les cycles gardant leur cohérence**
- **⇒ Une CCV des fluctuations à petite échelle (Résolues par la PIV !!)**

Phase de rupture : Analyse par POD invariante en phase

- **Analyse statistique conditionnelle de la phase de rupture**
  - Basée sur l'état de l'écoulement au PMH
  - Le premier mode de la POD invariante en phase garde de façon optimale la cohérence spatio-temporelle de l'écoulement (dans le domaine de mesure !)
  - Définition objective de la variabilité à grande échelle à cette phase importante

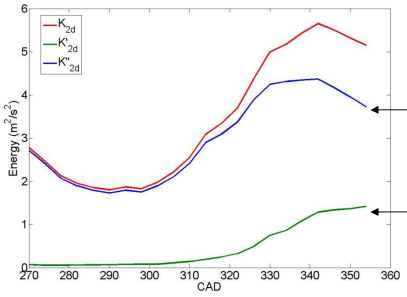
$$Ec = \frac{1}{2S}\int_S \left(\langle U\rangle^2 + \langle W\rangle^2\right) ds$$

$$Ef = \frac{1}{2S}\int_S \left(\langle u^2\rangle + \langle w^2\rangle\right) ds$$



Synthèse : Phase de rupture : Analyse par POD invariante en phase

- **Analyse statistique conditionnelle de la phase de rupture**
  - Basée sur l'état de l'écoulement au PMH
  - Le premier mode de la POD invariante en phase garde de façon optimale la cohérence spatio-temporelle de l'écoulement (dans le domaine de mesure !)
  - Définition objective de la variabilité à grande échelle à cette phase importante



72%

28%

Décomposition Triple

Turbulence portée par tous les états

Contribution de la variation cycle à cycle

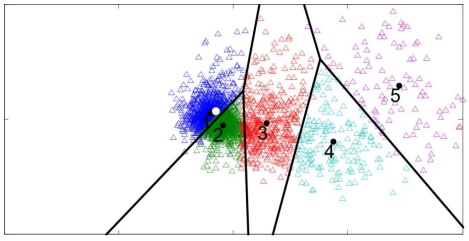
Cluster Analysis

- **POD Approach :**
  - The direct use of a reduced set of modes, random variables and eigenvalues spectrum for physical analysis can be difficult and subjective
- **Alternative strategies :**
  - able to define "groups" of flow and concentration snapshots in an objective way ??
- **Cluster-based analysis :**
  - Starts with a set of snapshots and the choice of a predefined distance between features
  - Data is then organized in order to maximize inner-cluster similarity and to minimize inter-cluster similarity

Clustering methodology

- **K-means algorithm (MacQueen 1967)**
  - used with the Euclidian distance
  - A number of five clusters is chosen to compute the phase evolution of the statistics with a reasonable statistical convergence.
  - Due to the POD decomposition, the squared Euclidean distance between two velocity fields is : $D_{ij} = \sum_{k=1}^{N_{mod}} \left(a_i^{(k)} - a_j^{(k)} \right)^2$

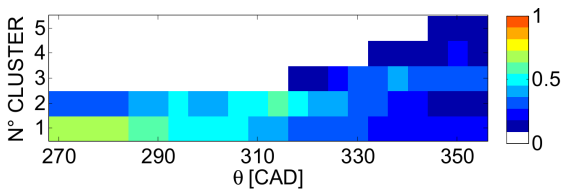
- **Clusters sorted according to their distance to the mean flow at 270CAD (mid-compression):**
  - cluster C_1 is chosen as the nearest while C_5 is the most distant cluster.



MdS representation with the corresponding voronoi diagram – for details see Kaiser et al. (2014).

Tumble Breakdown

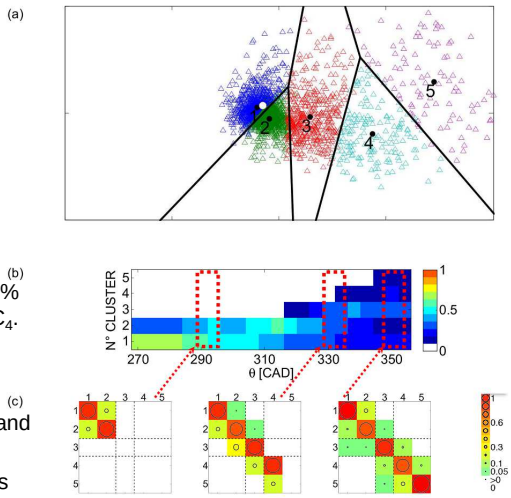
- **At each phase θ**
  - assign a probability where $q_k(\theta)=n_k(\theta)/N$ (N=161 : Number of Cycles)
  - $n_k(\theta)$: number of snapshots that belong to cluster k for k= 1,…,5.



  - Expansion during tumble breakdown
  - The PDF at ignition is almost uniform and a large span of flow states is therefore observed at the end of the compression.

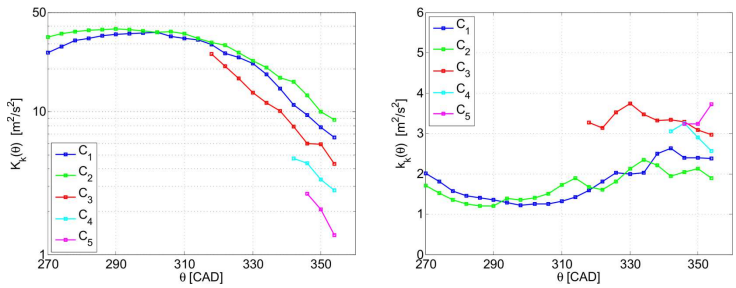
Tumble Breakdown (TB)

- **At each phase θ**
  - Transition matrix T_{jk} is the probability of moving from cluster C_k at phase θ to cluster C_j at phase θ +Δθ.
- Evolution occurs only by going through the transition cluster 3
  - Transition matrix from 330° to 334°:C_3 is fed by C_2 (30%) and 20% of C_3 population is transferred to C_4.
- A detailed analysis shows that :
  - The transfer to C_3 begins at 300° and peaks at about 334°
  - Transfer from C_3 to distant clusters begins at 320° and peaks at about 340°.



Tumble Breakdown (Conditional statistics)

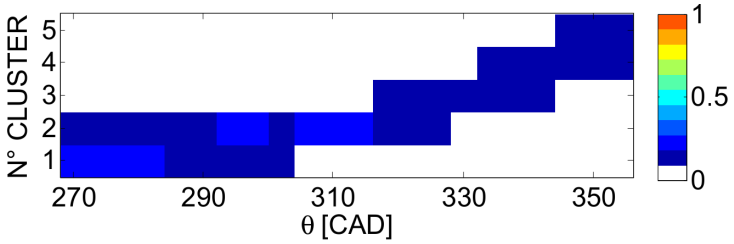
- **$K_k(\theta)$ and $k_k(\theta)$:**
  - spatially averaged kinetic energy per unit mass of the mean flow and the mean fluctuating kinetic energy for the PIV snapshots of the cluster k



- Tumble Breakdown phenomenology (stat. Computed if more than 20 samples)
- K is clearly the lowest (6x) and k (40%) the highest for the most distant clusters at the end of the compression
- Triple decomposition : turbulence carried by flow state : about 70%

Tumble Breakdown

- **A "stable" and potentially "cleaner" engine concept :**
  - completion of tumble breakdown at each cycle
  - trajectories starting in the cluster space from C1 and C2 at mid compression and leading to C4 & C5 at TDC
  - Computation of the conditional probabilities « ending in C4 or C5 at TDC »

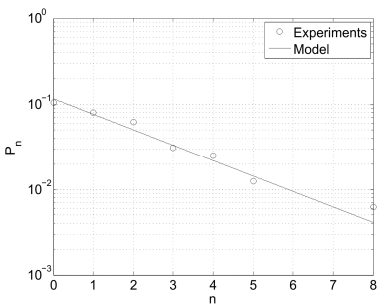


$$q_{k|b}(\theta) = n_{k|b}(\theta) / N$$

  - gradual destabilisation of the large scale rotating motion due to flow confinement during the final phase of the compression

Tumble Breakdown

- **we can use the fact that a succession of trajectories for consecutive cycles is available :**
  - no evidence that condition "b" occurs with a fixed frequency
  - n=0,1,2,… the number of engine cycle(s) between two consecutive engine cycles satisfying constraint "b".



$$\alpha = [q_4 + q_5](354°)$$

$$P_n = \alpha^2 (1-\alpha)^n$$

  - flow states at ignition are statistically independent for consecutive engine cycles

Phase invariant POD and Cluster Analysis Partial Conclusion

- **The state of the flow can be defined by :**
  - A projection on Phase Invariant POD mode 1
  - A particular Cluster
- **CCV can be associated with different sets of :**
  - Phase evolutions of random coefficient ONE $\left(a_n^{(1)}(\theta)\right)^2$
  - Trajectories in the cluster space
- **We can extract a particular subset associated with the completion of tumble breakdown carrying a higher fluctuating kinetic energy**
  - inner-cycle statistics confirm the idea of a gradual destabilisation of the large scale tumbling motion
  - inter-cycle statistics show that consecutive cycles are statistically independent

Phase invariant POD and Cluster Analysis Partial Conclusion

- **POD can lead to ROM (cf work of Lumley team – Fogleman)**
- **Beyond the analysis illustrated here, corresponding phase averaged conditional statistical properties can also lead to Cluster-based reduced order modelling (Kaiser et al. 2014).**
- **POD and cluster analysis can be coupled but the two approaches must be considered as complementary.**

Conclusion

Introduction
Banc d'essai Renault – Techniques de mesure
Admission : Structure et Variabilité de l'écoulement
Interaction écoulement/paroi pendant la phase de compression
Déstabilisation du rouleau et CCV
Conclusion

Conclusion

- **Aérodynamique interne moteur : Compression / rotation / Turbulence**
- **Des structures d'écoulement tridimensionnelles et complexes**
  - Support du mélange et de la combustion
  - Un concept optimal et robuste doit être répétitif en structure, en intensité et en phase !
- **Les outils d'étude doivent être améliorés**
  - Difficile d'imaginer une démarche empirique.
  - Convergence des méthodologies pour le calcul et l'expérimentation
  - Simulation numérique instationnaire / Bases de données de références / Outils d'analyses et Filtres physiques pertinents sont donc indispensables
  - Méthodologies de couplage fort (Assimilation) paraissent prometteuses.

Conclusion

- **L'analyse des cohérences spatio-temporelles est fondamentale dans un grand nombre d'applications.**

- **Une connaissance de la physique à traiter me paraît indispensable**
  - Fortement associée à l'adaptation des méthodologies d'analyse aux situations considérées.

- **Les approches présentées ici peuvent être utilisées pour des grandes bases de données générées par PIV ou par LES**
  - Attention toutefois à la convergence statistique pour la LES
  - En moteur, le calcul d'un très grand nombre de cycles est impossible

Merci pour votre attention ….