



HAL
open science

Comparaison entre flot optique et corrélation croisée pour décrire la dynamique d'un système d'injection turbulent

Marie Truffot, Laurent Zimmer, Antoine Renaud, Franck Richecoeur

► To cite this version:

Marie Truffot, Laurent Zimmer, Antoine Renaud, Franck Richecoeur. Comparaison entre flot optique et corrélation croisée pour décrire la dynamique d'un système d'injection turbulent. 17^{ème} Congrès Francophone de Techniques Laser (CFTL 2022), Sep 2022, Louvain, Belgique. hal-03834691

HAL Id: hal-03834691

<https://hal.science/hal-03834691>

Submitted on 30 Oct 2022

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.

COMPARAISON ENTRE FLOT OPTIQUE ET CORRELATION CROISEE POUR DECRIRE LA DYNAMIQUE D'UN SYSTEME D'INJECTION TURBULENT

Marie Truffot^{a-b,*}, Antoine Renaud^b, Franck Richecoeur^b, Laurent Zimmer^b, Alain Cayre^a

(a) Safran Aircraft Engines, Site de Villaroche, Rond-Point René Ravaut, 77550 Moissy Cramayel, France

(b) Université Paris-Saclay, CNRS, CentraleSupélec, Laboratoire EM2C, 91190, Gif-sur-Yvette, France

*Correspondant: marie.truffot@centralesupelec.fr

Résumé : La dynamique d'une chambre de combustion à l'injection multipoint étagée de combustible liquide est étudiée à l'aide d'images de diffusion de Mie. Les champs de vitesse sont obtenus en utilisant d'une part la corrélation croisée (CC) et d'autre part un algorithme de flot optique (OF, [2]). Cette étude a pour but de comparer ces deux méthodes de traitement dans une configuration plus complexe. La dynamique de l'écoulement turbulent est étudiée dans un cas non pulsé et dans un cas où le débit d'air est modulé par un système de type sirène à une fréquence fixe et maîtrisée, créant des structures cohérentes. Dans un premier temps l'applicabilité du flot optique à des champs de vitesse turbulent et même modulé est vérifié. Ensuite, une Décomposition Orthogonale aux valeurs Propres (POD) est appliquée sur les champs de vitesses modulé obtenus en corrélation croisée sur des images prises aléatoirement afin d'en extraire la dynamique. La POD est également utilisée pour filtrer les champs instantanés et le nombre de modes nécessaires à une bonne représentation de l'écoulement est discuté.

1 Introduction

Pour faire face aux enjeux environnementaux, le secteur de l'aéronautique se tourne de plus en plus vers des régimes de combustion prémélangée pauvre. Cependant, ce régime tend à développer des instabilités ainsi que des phénomènes de retour de flamme et d'extinction. Il est donc nécessaire de comprendre la dynamique de ces systèmes pour caractériser et éliminer le développement de ces instabilités de combustion.

Les diagnostics expérimentaux ont beaucoup progressé et offrent désormais une extraordinaire résolution spatiale et temporelle. Cependant, les outils de traitement n'ont pas autant évolués et n'exploitent pas pleinement les données brutes visant à la description de réponses de flamme complexes. En pratique, la dynamique du brûleur est principalement étudiée à l'aide de vélocimétrie par images de particules (PIV) dont les images sont prises à phase fixe. Pourtant, les algorithmes de corrélation croisée habituels dégradent la résolution spatiale et ne résolvent pas de manière adéquate les régions ayant des forts gradients de vitesse. Quénot et al. [1] et Hongwei et al. [2] mettent en évidence la pertinence d'appliquer la méthode de flot optique aux images de diffusion de Mie 2D à la place des algorithmes classiques de corrélation croisée pour obtenir une meilleure résolution spatiale de l'écoulement. De plus, une précédente étude sur la dynamique d'un brûleur laminaire ([3]) a pu montrer la capacité du flot optique à obtenir une résolution spatiale plus élevée et à fournir une quantification raisonnable de la dynamique avec moins d'échantillons que la corrélation croisée par des décomposition en modes dynamiques.

Dans cette étude, la dynamique d'un écoulement non réactif est étudiée en deux temps. Dans un premier temps, le flot optique est comparé à des résultats de corrélation croisée pour des mesures réalisées dans une configuration semi-industrielle. Ensuite, une analyse POD est appliquée à des images prises aléatoirement afin d'en extraire la dynamique. Les signaux filtrés à partir de la POD sont enfin comparé à une moyenne de phase réalisée sur les mêmes images.

2 Dispositif expérimental et méthodes

2.1 Montage expérimental

Le banc BIMER [4] est équipé d'un injecteur étagé multipoint basé sur une géométrie industrielle dans lequel le carburant et l'air peuvent se mélanger avant d'entrer dans la chambre de combustion. L'injecteur relie le plénum à une chambre rectangulaire (500 × 150 × 150 mm³) équipée de deux parois en quartz permettant un accès optique sur la zone de combustion. Le débit d'air est contrôlé avec un débitmètre Bronkhorst In-Flow. Dans la présente études deux débits d'air seront utilisés : 28g/s et 35g/s, toujours à température ambiante.

L'injecteur est composé de deux étages comprenant chacun un swirler d'air ainsi qu'une injection de carburant. L'étage amont, appelé étage pilote, contient une vrille de 18 aubes permettant à environ 13% du débit d'air global de passer à travers cet étage. L'étage aval, appelé étage de décollage, contient une vrille à 20 aubes à travers laquelle circulent les 87% restants de l'air. Dans cette étude non réactive, aucun carburant n'est injecté. En sortie, le diamètre du système d'injection global est de 50mm.

Le banc comporte un dispositif de sirène placé entre le préchauffeur (non allumé pour cette étude) et le plénum. Ce dispositif, créé par la société Combustion Bay One (CBOne, Graz, Autriche), permet d'effectuer des modulations de débit d'air, avec une fréquence et une amplitude contrôlées indépendamment [5]. Pour cette étude, une fréquence de 320Hz et un taux de recouvrement [6] de 88% sont imposés lorsque l'écoulement est modulé.

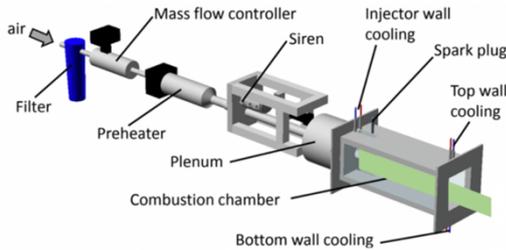


Figure 1 : Schéma du banc BIMER

Ce brûleur est équipé de plusieurs diagnostics permettant l'étude de sa dynamique. Un laser Nd:YAG à 532nm, 8ns de pulse et à une fréquence de 10Hz est utilisé, avec à un système de lentilles, pour créer une nappe verticale entrant par la sortie de la chambre et illuminant la chambre sur plus de moitié de sa hauteur. Cette nappe laser, conjointement avec des gouttes d'huile injectées dans l'écoulement d'air, permet de mesurer le champ de vitesse des gaz frais dans la chambre. Le délai entre deux impulsions laser consécutives est de 10 μ s. Les gouttelettes d'huile ont une taille typique inférieure à 2 μ m, conduisant à un petit nombre de Stokes. Les champs de vitesse sont mesurés à l'aide d'images de diffusion de Mie 2D. Lorsque l'écoulement est modulé les images sont prises à des phases aléatoires par rapport à la modulation sinusoïdale de la sirène. Les images sont prises à l'aide d'une caméra de résolution de 2048x2048 pixels et les images sont acquises à 90° de la nappe laser.

Cette étude porte sur la caractérisation d'un écoulement turbulent soumis ou non à des modulations. D'une part, un algorithme classique de corrélation croisée (CC) est utilisé pour extraire la vitesse d'images 2D de diffusion de Mie. Ce calcul réalisé avec DynamicStudio se base sur un raffinement des fenêtres de corrélation croisée. Après deux passages, la taille finale de la fenêtre est de 32x32 pixels avec un recouvrement de 50%. Aucun algorithme de filtrage n'est appliqué. D'autre part, un algorithme de flot optique (OF) (basé sur le travail de [7]) est appliqué sur les mêmes images. La première différence entre ces deux méthodes est le temps de

calcul. En effet, alors que l'algorithme de corrélation croisée s'exécute en plusieurs minutes, le flot optique peut prendre plusieurs jours. Toutefois, le flot optique donne accès à des champs de vitesse de 2048x2048 pixels alors que la corrélation croisée fournit des champs de 127x127 pixels.

2.2 Méthodes de calcul des champs de vitesse par flot optique

Une approche pyramidale est utilisée pour les algorithmes de Flot Optique (OF) avec une taille d'image initiale qui est calculée à une résolution globale de 27X28 pixel. Cette image est ensuite augmentée récursivement d'un facteur 2 jusqu'à atteindre la taille d'image finale de 848X896 pixels. L'interpolation entre deux niveaux est définie comme bi-cubique, et un filtre médian de 5X5 est utilisé lors de l'augmentation de la taille de la fenêtre. Aucun filtre n'est appliqué à l'étape finale de ce calcul pour obtenir des données aussi brutes que possible. En ce qui concerne l'OF, plusieurs algorithmes ont été testés, chacun basé sur la résolution de la même équation initiale :

$$E(u, v) = \sum_{i,j} \{ \rho_D (I_1(i, j) - I_2(i + u_{i,j}, j + v_{i,j})) + \lambda [\rho_S (u_{i,j} - u_{i+1,j}) + \rho_S (u_{i,j} - u_{i,j+1}) + \rho_S (v_{i,j} - v_{i+1,j}) + \rho_S (v_{i,j} - v_{i,j+1})] \}$$

où u , v , I_1 , I_2 , λ , ρ_D , ρ_S désignent les composantes horizontales, les composantes verticales, l'image 1, l'image 2, le paramètre de régularisation, les fonctions de pénalisation des données et les fonctions de pénalisation spatiale. Les indices i et j représentent la position d'un pixel dans une image. Avec les données résolues dans le temps, il est possible de déterminer la précision réelle des mesures instantanées en utilisant plusieurs pas de temps entre deux images et de les comparer avec l'analyse cumulative d'un seul pas de temps. Ce traitement permet également de discriminer les différents algorithmes, très dépendants des images. Une analyse détaillée a été effectuée pour déterminer les meilleurs algorithmes parmi tous ceux présentés ([7]). Les résultats montrent que les paramètres optimaux sont les suivants : la fonction de pénalité $\rho(x)$ est définie comme la pénalité de Charbonnier $\sqrt{x^2 + \epsilon^2}$ et ϵ est fixé à 0,0010.

Afin d'évaluer la résolution spatiale du flot optique, l'algorithme choisi est utilisé pour traiter des images réelles avec des déplacements connus. Les images proviennent de la base de données fournie par [3]. Les images sont fournies avec des déplacements connus (pris simultanément par une approche PIV à haute résolution). Le cas est celui d'un écoulement stationnaire incompressible avec un diamètre variable de l'image de la particule, jeu de données B016 : diaphragme de la caméra = 2,8. L'écoulement

représente un jet se développant dans un environnement calme avec des déplacements typiques entre deux images d'environ 8 pixels au maximum. La couche de cisaillement est représentée par une taille d'environ 20 px, ce qui correspond à la résolution spatiale typique de l'algorithme de corrélation croisée. Afin d'évaluer la capacité du flot optique à gérer de tels gradients, une moyenne de plus de 500 images est calculée. Les résultats sont affichés dans la figure 1 pour montrer un profil de vitesse typique pris dans le jet. Les résultats du flot optique et de l'approche par corrélation croisée sont affichés avec les déplacements réels mesurés par une autre approche simultanée de vélocimétrie par image de particules à plus haute résolution.

Comme le montrent les profils dans la figure 2, le Flot Optique est capable de récupérer le gradient de l'écoulement, avec un gradient typique de 0,33 px/px. La différence typique est de l'ordre de 0,3 px au maximum dans la région du gradient le plus abrupt. Cela correspond à une différence de position d'un pixel dans la direction horizontale, le gradient étant de 0,33 px/px. Par conséquent, on peut conclure que la résolution spatiale du flot optique peut être considérée comme une fenêtre carrée de 3X3 pixel, puisqu'il y a au maximum un écart d'un pixel par rapport aux déplacements réels supposés.

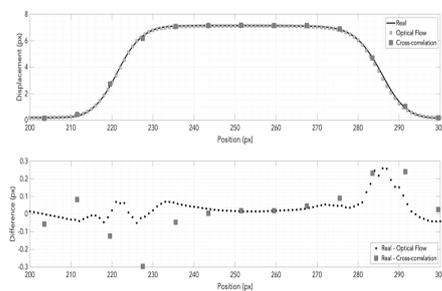


Figure 2 : Comparaison entre flot optique et corrélation croisée

3 Ecoulement statique

3.1 Comparaison OF-CC

L'étude porte tout d'abord sur le point d'opération à 35g/s d'air injecté dans la chambre de combustion. Les calculs sont ici effectués sur 3500 images de diffusion de Mie. Les deux méthodes présentées précédemment sont donc appliquées aux mêmes images. La figure 4 présente le champ de vitesse axiale pour la région supérieure de la chambre, les résultats du flot optique sont affichés en haut et ceux de la corrélation croisée en miroir en bas afin de faciliter la comparaison. Ainsi, la structure de l'écoulement semble globalement

similaire entre les deux méthodes. La principale différence réside dans la vitesse maximale calculée qui est supérieure dans le cas de la CC par rapport à l'OF. Cela est confirmé par les profils de vitesse axiale présentés Figure 4 qui montrent que pour une distance de 3cm par rapport au fond de chambre, le flot optique semble sous-estimer la vitesse maximale atteinte. En s'éloignant du fond de chambre, le flot optique retrouve les niveaux de vitesse calculés par corrélation croisée. Ainsi, le flot optique semble capable d'estimer les champs de vitesse d'un écoulement turbulent.

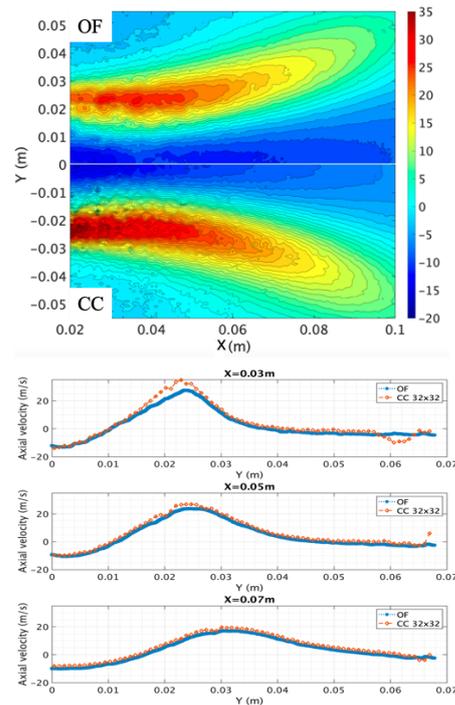


Figure 4 : Haut : champ de vitesse axiale pour 35g/s calculé par OF (en haut) et CC (en bas) ; Bas : Profils de vitesse axiale calculé avec OF et CC pris à 3, 5 et 7 cm

3.2 Comparaison 28g/s-35g/s (CC)

Le point étudié ci-dessus à 35g/s est maintenant comparé à un écoulement ayant un débit de 28g/s. Cette comparaison est ici effectuée à l'aide de la corrélation croisée. Les résultats présentés ci-dessous sont obtenus à partir de 3500 images. Trois profils de vitesse adimensionnés par leurs maximums à différentes distances du fond de chambre sont montrés dans la Figure 5. Pour les deux profils les plus éloignés les courbes issues de l'écoulement ayant pour débit d'air 28g/s se superposent parfaitement à celles issues de l'écoulement à 35g/s. Une légère différence peut être observée sur le profil à 3.5cm de distance au niveau de $Y=-0.02$, à ce point, la vitesse calculée pour 35g/s est inférieure à celle pour 28g/s. Cette différence peut être attribuée à une erreur de la mesure sur ce point au vu

du caractère symétrique de l'écoulement et de la bonne superposition des courbes pour le côté opposé ($Y=0.02$). Ainsi, cette étude montre la conservation de la structure globale de l'écoulement lors de l'augmentation de débit : la zone de recirculation centrale est notamment de même taille et situé au même endroit. Ainsi, il y a une autosimilarité de l'écoulement entre 28g/s et 35g/s.

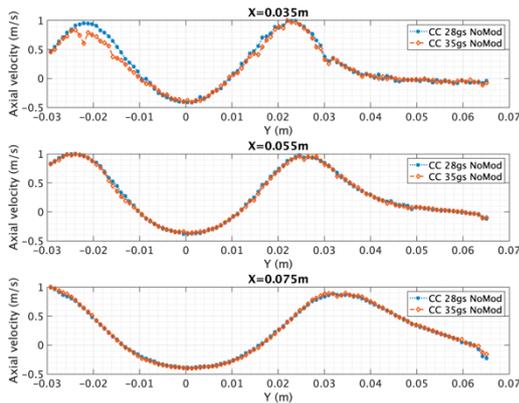


Figure 5 : Profils de vitesse axiale adimensionnée par la vitesse maximale pour 28g/s et 35g/s pris à 3.5, 5.5 et 7.5 cm

4 Ecoulement modulé par sirène

4.1 Analyse de l'écoulement moyen :

Une étude similaire à l'étude précédente est menée afin d'apprécier la capacité des deux méthodes (corrélation croisée et flot optique) à déterminer le champ de vitesse d'un écoulement modulé ici à l'aide du dispositif sirène. Cette comparaison est toujours réalisée sur un point d'opération de débit 35g/s. La modulation imposée au débit d'air à pour fréquence 320Hz et l'amplitude et maximale (le taux de recouvrement imposé est de 88%). 3500 images de diffusion de Mie sont utilisées pour calculer les champs de vitesse avec les deux méthodes. La figure 6 présente la partie supérieure du champ de vitesse axiale pour chaque méthode. Une présentation en miroir permet la comparaison des deux écoulements calculés. La figure 6 montre ainsi que les deux méthodes donnent des écoulements quasiment identiques que ce soit dans la structure mais aussi dans les niveaux de vitesse axiale. Ce qui est validé par les profils de vitesse présentés Figure 6, les profils de vitesses axiales situés à 5 et 7cm du fond de chambre sont ainsi superposés pour les deux méthodes. La différence entre les deux résultats réside dans le profil situé à 3cm du fond de chambre. Pour ce profil, le calcul de corrélation croisée donne une vitesse inférieure au flot optique à 2cm du centre. Au vu de la

forme du profil, cela semble dû à un problème lors du calcul qui n'apparaît pas pour le flot optique. En effet, comme vu section 2.2, le flot optique permet d'obtenir une meilleure résolution et il décrit mieux les gradients de vitesse. Le flot optique permet donc dans ce cas d'obtenir un meilleur résultat pour le champ de vitesse. Cela montre que le flot optique permet de calculer des champs de vitesse non seulement dans des configurations turbulentes mais aussi pour des écoulements modulés.

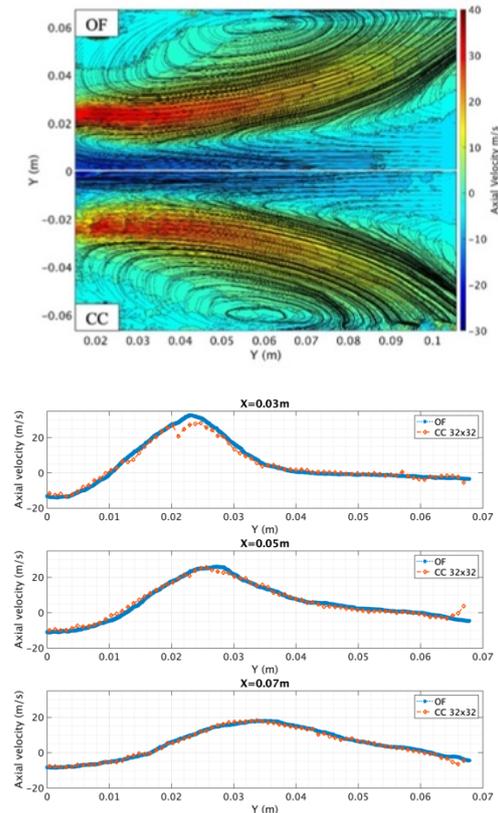


Figure 6 : Haut : champ de vitesse axiale pour 35g/s modulé calculé par OF (en haut) et CC (en bas) ; Bas : Profils de vitesse axiale calculé avec OF et CC pris à 3, 5 et 7 cm

4.2 Comparaison 28g/s-35g/s (CC)

Comme lors de l'étude partie 3, l'écoulement modulé à 35g/s est maintenant comparé à un écoulement de débit 28g/s subissant les mêmes modulations (320Hz et CSR 88%). Cette comparaison est là encore effectuée à l'aide de la corrélation croisée appliquée à 3500 images. La figure 8 présente les résultats obtenus pour trois profils de vitesse adimensionnés par leurs maximums à différentes distances. Le premier profil à 3cm ne montre pas de différence entre les deux débits étudiés. Les différences commencent à apparaître à partir de 5.5cm du fond de chambre, à cette distance seule une

légère différence dans la largeur du bras principal est notable dans la zone entre 3 et 5cm du centre de la chambre. En allant plus loin, le profil à 7.5cm montre des différences nettement plus marquées entre l'écoulement modulé à 28g/s et à 35g/s. A cette distance le bras principal de l'écoulement semble plus large avec une vitesse plus faible pour l'écoulement à 35g/s. Ainsi, cette étude montre qu'en s'éloignant de l'injection la structure de l'écoulement présente des différences entre l'écoulement modulé de 28g/s et celui de 35g/s.

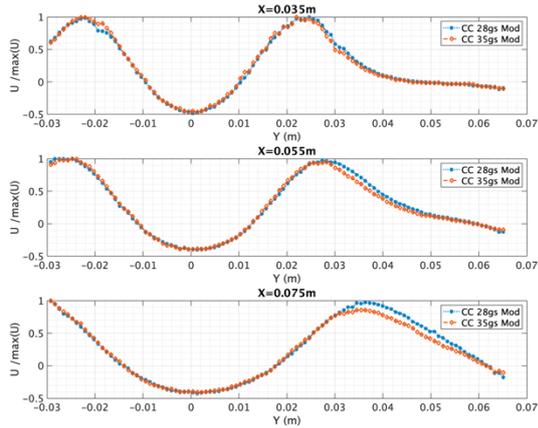


Figure 8 : Profils de vitesse axiale adimensionnée par la vitesse maximale pour 28g/s et 35g/s modulé pris à 3.5, 5.5 et 7.5 cm

4.3 Analyse de la dynamique de l'écoulement

Enfin, la dynamique de l'écoulement est étudiée à l'aide d'une décomposition orthogonale aux valeurs propres (POD). La base de données utilisée se compose de 500 images prises aléatoirement lors du cycle de modulation pour un débit de 28g/s et une modulation de 320Hz et de CSR 88%. Pour chaque paire d'images, la position angulaire dans le cycle de modulation est enregistrée et l'analyse de ces angles montrent que le cycle est uniformément échantillonné. La corrélation croisée est ici utilisée pour ces analyses. La POD consiste à décomposer un champ vectoriel (ici $D(x,t)$) en un ensemble de fonctions spatiales $\phi_k(x)$ (appelés modes par la suite) modulées par des coefficients temporels aléatoires $c_k(t)$ tel que:

$$D(x,t) = \sum_{k=1}^N c_k(t) \phi_k(x)$$

Ainsi, le premier mode représente la moyenne de l'écoulement et les autres modes représentent les fluctuations. Dans un premier temps, l'extraction des modes POD n'a pas montré de modes de modes énergétiques dominant (or le premier mode

représentant la moyenne). Afin d'associer un ou plusieurs modes POD à la modulation imposée à l'écoulement, les coefficients temporels associés à chaque mode sont tracés en fonction de la position angulaire du cycle à laquelle chaque image a été prise. Avec cette étude, deux modes ont pu être identifiés comme étant cohérents avec la modulation, ce sont les modes 5 et 6 présentés Figure 9. La figure 10 présente ainsi les tracés des coefficients temporels en fonction de la phase pour ces deux modes. Ils montrent que ces deux modes oscillent sinusoidalement avec la modulation imposée par la sirène à l'écoulement. Cette analyse a permis d'identifier les modes associés à la modulation malgré des niveaux énergétiques similaires aux autres modes.

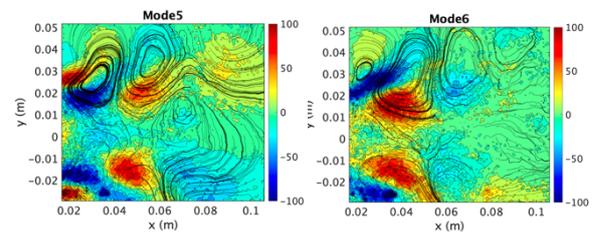


Figure 9 : Modes 5 et 6 extrait de la POD pour 28g/s module colorés par la vitesse axiale correspondante.

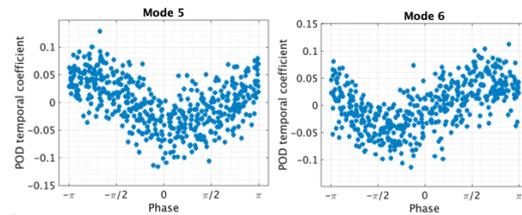


Figure 10 : Coefficients temporels des Modes 5 et 6 extraits de la POD pour 28g/s modulé en fonction de la phase associée à la modulation

Les champs de vitesse sont désormais filtrés avec la POD : ils sont reconstruits avec un nombre de modes limités afin de supprimer le bruit contenu dans les modes de très faible énergie. Ainsi, les champs de vitesse est tout d'abord reconstruit avec 6 modes pour inclure les deux modes associés à la modulation, ces 6 modes représentent 15% de l'énergie des fluctuations. Ce filtrage est ici comparé à un filtrage pour lequel 33% et 66% de l'énergie des fluctuations sont pris en compte, c'est à dire une reconstruction avec respectivement 23 et 150 modes. Afin de comparer ces différents filtrages, une moyenne de phase basée sur la phase de la modulation est appliquée aux données brutes ainsi qu'au trois jeux de données filtrées. Les images étant prises aléatoirement dans le cycle, la moyenne est effectuée sur des intervalles de phase. Ici, le cycle est divisé en 10, les champs de vitesse sont donc

moyennés sur un intervalle de largeur : 0.2Π . Les tracés figure 11 montrent la vitesse obtenue en un point au centre du jet pour $X=3.5\text{cm}$ et $Y=2.5\text{cm}$. Le tracé correspondant au filtrage à 6 modes montre que le champ de vitesse reconstruit contient bien la modulation imposée au vu de la forme sinusoidale de la vitesse à ce point. Toutefois la modulation est sous-estimée avec ce filtrage puisque la vitesse oscille de 5m/s alors que les données brutes montrent que la vitesse subit des fluctuations de l'ordre de 10m/s . Cela est dû au fait que les 6 modes utilisés dans cette reconstruction ne représentent que 15% de l'énergie totale des fluctuations. Les reconstructions prenant en compte 33% et 66% montrent des vitesses très proches des vitesses issues des données brutes. Dans ce cas, un filtrage qui ne considère que 33% de l'énergie des fluctuations (c'est à dire 23 modes) semble suffisant afin de représenter correctement l'écoulement.

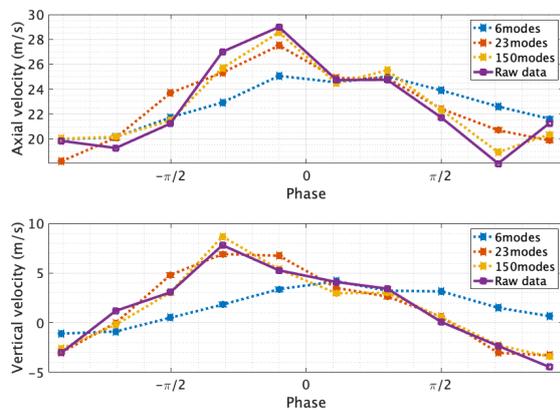


Figure 10 : Vitesse axiale (haut) et verticale (bas) reconstruites avec 6, 23 et 150 modes (correspondant à resp. 15%, 33% et 66% de l'énergie) en fonction de la phase associée à la modulation

5 Conclusion

Dans un premier temps, cette étude a montré la pertinence de l'utilisation du flot optique pour des écoulements turbulents. En effet, dans cette configuration semi-industrielle, le flot optique a pu calculer des champs de vitesse similaires aux champs de vitesse calculés par corrélation croisée. Ce résultat a été montré à la fois pour l'écoulement naturel de la chambre de combustion ainsi que pour un écoulement modulé en amont à l'aide d'un dispositif de sirène.

D'autre part, la structure de l'écoulement à 28g/s et 35g/s a été étudiée à l'aide de champ de vitesse calculé par corrélation croisée. L'autosimilarité de la structure de l'écoulement entre ces deux débits a été montrée pour l'écoulement naturel. L'écoulement modulé présente quant à lui un léger changement de structure dans la partie de la chambre éloignée de plus de 5cm du fond de chambre. En effet, dans le cas 35g/s , à partir

de cette distance le jet semble être plus large et avoir une vitesse adimensionnée plus faible par rapport au cas 28g/s .

Au vu de ces différences au niveau du champ de vitesse moyen, des méthodes d'analyses de dynamique ont été mis en place. L'étude présentée ci-dessus a montré la possibilité de retrouver la dynamique associée à la modulation à partir d'images prises aléatoirement auxquelles est appliqué un algorithme de corrélation croisée et un traitement POD. Les modes recherchés sont ainsi détectés en analysant les coefficients temporels des modes POD avec la phase correspondant aux images dans le cycle de modulation. Dans cette étude ce sont les modes 5 et 6 qui ont été ainsi retrouvés. Enfin, la capacité à filtrer les données à partir des modes trouvés est testée. Le filtrage à partir de 6 modes semble ainsi capable de retranscrire la modulation mais avec des amplitudes plus faibles qu'en réalité dû au fait que seulement 15% de l'énergie des fluctuations est contenue dans ces 6 modes. Cette étude a montré qu'en considérant 33% de l'énergie des fluctuations, les vitesses sont bien représentées.

6 References

- [1] G. M. Quénot, J. Pakleza, T. A. Kowalewski, Particle image velocimetry with optical ow, Experiments in Fluids 25, 177-189 (1998)
- [2] Wang Hongwei, Huang Zhan, Gong Jian, Xiong Hongliang, The Optical Flow Method Research of Particle Image Velocimetry, Procedia Engineering 99, 918-924 (2015)
- [3] Lee J, Saito T, Nakaya S, Tsue M and Zimmer L, On DMD processing of Mie scattering images in pulsated flows, submitted to Exp. Fluids.
- [4] Renaud A, Zimmer L and Ducruix S, Experimental Study of the Precessing Vortex Core Impact on the Liquid Fuel Spray in a Gas Turbine Model Combustor, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 141(11): 111022, 2019.
- [5] Giuliani, F., P. Gajan, O. Diers, and M. Ledoux (2002). Influence of pulsed entries on a spray generated by an air-blast injection device: An experimental analysis on combustion instability processes in aeroengines. Proceedings of the Combustion Institute 29(1), 91-98. (p. 25)
- [6] Antoine Renaud. High-speed diagnostics for the study of flame stabilization and transient behaviour in a swirled burner with variable liquid-fuel distribution. (2015)
- [7] Sun D, Roth S, Black MJ (2014) A quantitative analysis of current practices in optical flow estimation and the principles behind them. International Journal of Computer Vision 106(2):115-137