



HAL
open science

Dynamique 3D temporelle d'un jet confine chauffe inverse

Franck Lefebvre, Carole Gobin, Gilles Godard, Corine Lacour, Luminita Danaila, Emilien Varea, Bertrand Lecordier

► **To cite this version:**

Franck Lefebvre, Carole Gobin, Gilles Godard, Corine Lacour, Luminita Danaila, et al.. Dynamique 3D temporelle d'un jet confine chauffe inverse. Congrès Francophone de Techniques Laser(CFTL 2022), Sep 2022, Louvain, Belgique. hal-03859470

HAL Id: hal-03859470

<https://hal.science/hal-03859470v1>

Submitted on 18 Nov 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.

DYNAMIQUE 3D TEMPORELLE D'UN JET CONFINE CHAUFFE INVERSE

Franck Lefebvre^a, Carole Gobin^a, Gilles Godard^a, Corine Lacour^a, Luminita Danaila^b, Emilien Varea^a, Bertrand Lecordier^{a,*}

(a) Normandie Univ, INSA Rouen, UNIROUEN, CNRS, CORIA, 76000 Rouen, France

(b) M2C UMR 6143, Université de Rouen, 76130, Mont Saint Aignan, France

*Correspondant: bertrand.lecordier@coria.fr

Résumé : Les régimes en combustion diluée de type MILD combustion (Moderate or Intense Low oxygen Dilution) permettent d'atteindre des niveaux d'émission de polluants extrêmement faibles. Cependant, le manque de connaissances sur le mélange turbulent, sa 'qualité' et les temps caractéristiques des différents phénomènes engendrés, empêchent le développement de réacteurs plus efficaces notamment quand on considère des fortes puissances. Une géométrie particulière pour les réacteurs de type MILD est représentée par les réacteurs dit à contre-courant. L'injection et la sortie des gaz se font par des buses situées dans le même plan d'injection. Dans cette configuration, la recirculation des gaz est améliorée. Dans ce travail, nous proposons une étude fondamentale afin d'améliorer nos connaissances sur ces processus de mélange et ainsi à terme d'optimiser ces réacteurs d'un point de vue du design pour réduire les émissions polluantes. Dans cette étude, un prototype de contre-courant est étudié de manière expérimentale. On s'intéressera à quantifier le mélange turbulent d'un jet confiné chauffé inversé. On s'intéressera particulièrement à comprendre la nature des interactions à l'interface Turbulent/Non-Turbulent, qui est le lieu de naissance de la turbulence grâce à un système 3D résolu en temps

1 Introduction

La production d'énergie électrique est l'une des questions majeures dans le contexte des développements économiques éco-responsable. Selon le ministère américain de l'énergie, d'ici 2040, le gaz naturel (pour les turbines à gaz) et les énergies renouvelables seraient les deux premiers types de combustible pour la production d'électricité. Le gaz naturel et les énergies renouvelables verraient leur contribution à la production d'électricité augmenter de 15 et 30 %, respectivement. Les autres ressources actuelles (nucléaire, charbon, liquides) verraient leur contribution diminuer. Par conséquent, pour répondre à la demande d'énergie électrique, surtout lorsqu'il s'agit de faire face aux fluctuations de l'approvisionnement énergétique inhérentes aux sources d'énergie renouvelables, les turbines à gaz constituent une solution fiable. Cependant, une grande variabilité dans leurs conditions de fonctionnement entraîne un niveau élevé d'émissions polluantes et des risques élevés de dommages.

La combustion en régime dilué (par exemple MILD - Moderate or Intense Low oxygen Dilution) semble être un procédé propice aux turbines à gaz pour garantir de faibles niveaux d'émissions dans une large gamme de conditions de fonctionnement. Dans ce régime, le combustible est mélangé à un air fortement dilué et chauffé pour créer une zone de réaction spatialement répartie avec une température de pointe réduite. Les réacteurs CONfined COunterflow (CO²Res) ont été conçus dans le but de fournir les caractéristiques d'écoulement les plus favorables à la combustion MILD. Par conséquent, ils peuvent être considérés comme la référence idéale pour les études

de recherche visant à apporter la percée technologique nécessaire pour : i) améliorer l'efficacité et ; ii) réduire les émissions de polluants dans les applications de combustion MILD.

Pour optimiser la combustion MILD, le mélange rapide et efficace des réactifs avec les gaz d'échappement est obligatoire. Ce dernier n'est pas seulement un problème technique, mais le manque de connaissances théoriques sur le mélange turbulent dans de telles configurations d'écoulement de fluides complexes est clairement souligné (Kruse et al. 2015). Ce régime de combustion est a priori caractérisé par une compétition entre les échelles de temps de mélange et de chimie avec une forte influence des effets de diffusion différentielle (Christo et Dally, 2005, Cavaliere et de Joannon 2004). Elle diffère donc radicalement des flammes de jet conventionnelles pour lesquelles les modèles mathématiques prennent généralement en compte une chimie rapide et des effets de diffusion différentielle négligeables.

Le problème du mélange turbulent de jets hétérogènes -viscosité, densité, diffusivité différentielle- doit être abordé sous l'angle de la recherche fondamentale pour surmonter les obstacles scientifiques et techniques afin d'optimiser les procédés MILD. Les objectifs principaux sont centrés sur l'étude de la préparation du mélange et des échelles de temps caractéristiques de telles applications. Les interactions entre les fluides - à travers l'interface du jet - aux dynamiques différentes et aux propriétés thermo-chimiques variables sont d'une importance majeure. Le projet est abordé sous trois angles expérimental, numérique et analytique qui explorent les mélanges de fluides hétérogènes.

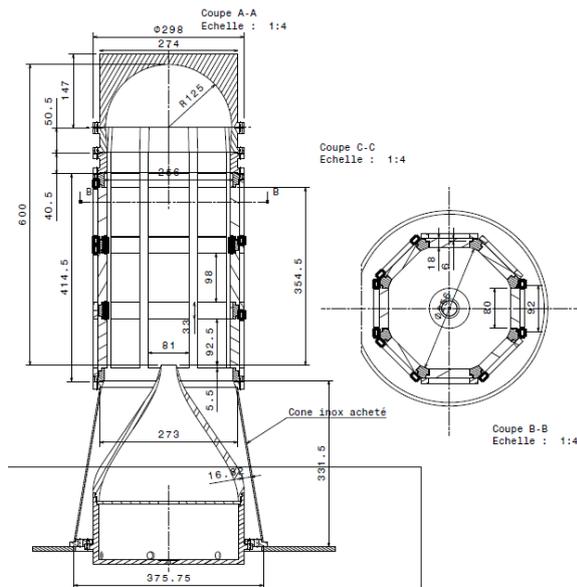


Figure 1 : Schéma en coupe du réacteur à contre-courant.

Dans cette étude, afin d'aborder les points développés précédemment, un dispositif expérimental de réacteur à contre-courant chauffé a été dimensionné et confectionné (Figure 1). Peu de configurations de jets confinés à contre-courant sont rapportées dans la littérature. Nous pouvons citer cependant celle de Risso et Fabre 1997 sur un écoulement liquide ou celle de Kruse et al. 2015 pour un écoulement gazeux appliqué à la combustion.

L'originalité de ce travail, en dehors de l'expérience elle-même, est d'avoir appliqué la méthode optique de PIV 3D dans le but de caractériser de façon volumique l'interaction entre le jet central et le jet de retour chauffé, et cela afin de simuler dans une situation modèle une réaction exothermique. Pour couvrir une large gamme de condition physique, trois nombres de Reynolds 2000, 5000 et 8000, et trois températures 24°C, 50°C, et 80°C ont été étudiés.

Dans ce papier, nous ne présenterons pas l'analyse physique de l'écoulement proprement dite, mais plus particulièrement l'implantation de la PIV 3D dans cette configuration complexe et confinée et pouvant par exemple présenter des variations d'indice de réfraction induites par le chauffage de l'écoulement dans la partie haute de l'expérience. Ce système a pour but à terme d'identifier les caractéristiques à l'interface entre le jet central et le jet de retour (chauffé). En effet, le jet normalement axisymétrique perd son axisymétrie instantanée du fait de la différence de densité entre le jet central et le jet de retour, voir Figure 2.

2 Dispositif expérimental

2.1 Réacteur à contre-courant

Pour cette étude, le schéma de principe du réacteur contre-courant est le suivant (Figure 1) :

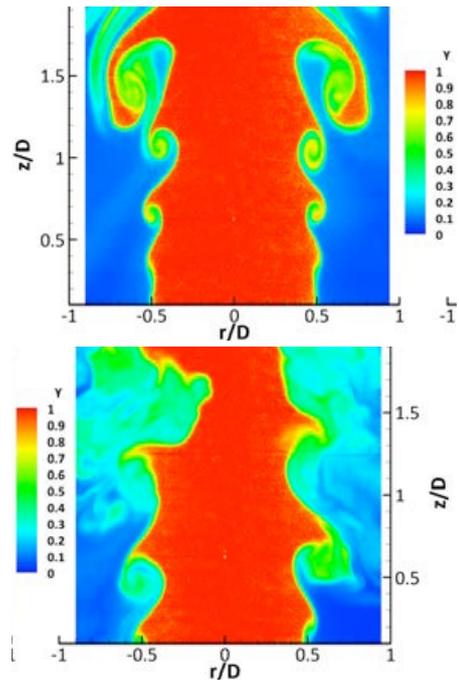


Figure 2 : Fraction de mélange pour le cas iso densité (haut) et densité variable (bas).

Le jet central est issu d'un convergent aux dimensions spécifiques pour respecter un profil de vitesse en sortie dit « top-hat », Antonia et Zhao. 2001. Le jet de sortie a un diamètre d de 30mm et débouche dans une chambre de 250mm de diamètre. La hauteur de la chambre suit les dimensions de Kruse et al. 2015 avec un ratio $l/d = 20$ soit 600 mm de haut. Une fois dans la partie haute, le jet est chauffé jusqu'à 80°C par contact avec une résistance électrique en serpentin. Les caractéristiques du jet seul sont reportées dans Voivenel et al. 2017. L'intensité de turbulence est faible (<1%). Ceci est vérifié afin que la stabilisation ou la déstabilisation du jet ne soit due qu'aux effets de variation de densité (chauffage) et non à des effets connexes, issus notamment d'anomalies lors de la préparation de l'écoulement.

La chambre de confinement est munie de 8 hublots sur son pourtour et cela à trois hauteurs différentes pour permettre de sonder à l'aide de diagnostic optique l'ensemble des phénomènes sur la totalité du volume. Pour faciliter l'application des diagnostics optiques, l'intégralité de l'installation est maintenue par des vérins mécaniques offrant un positionnement précis en hauteur. Grâce à ce dispositif, il est ainsi possible de sonder les phénomènes dans la chambre de confinement sans avoir à déplacer les diagnostics optiques. Cette approche permet beaucoup de flexibilité, en particulier lorsque des méthodes optiques lourdes comme la PIV 3D haute cadence sont implantées sur le dispositif à contre-courant.

2.2 Système d'acquisition de PIV 3D

Un système d'acquisition de PIV 3D résolu en temps est installé autour du dispositif expérimental. Sur la Figure 3 nous présentons vue du haut, l'ensemble de

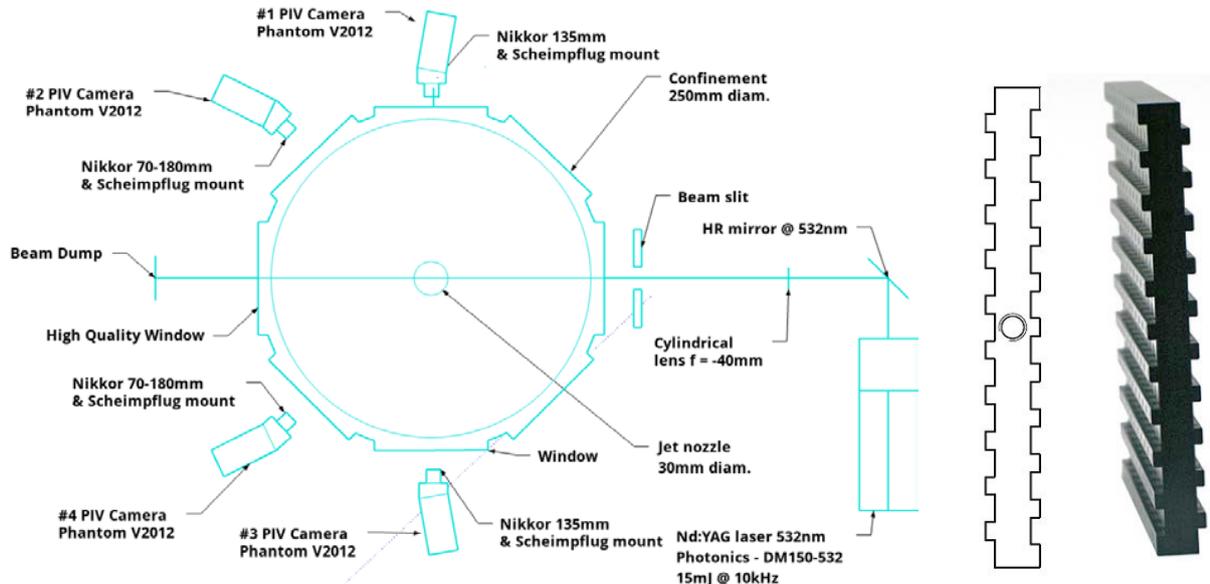


Figure 3 : Schéma de l'installation (gauche) et mire 3D de calibration double face (droite)

L'installation avec le système de PIV 3D. Ce dernier est constitué de : 4 caméras V2012 Phantom, équipées de montures Scheimpflug, un laser haute cadence de chez Photonics DM150-532 délivrant $2 \times 150W$ à 10kHz, et d'un bras optique de la société Lavison pour sécuriser le chemin optique. Comme nous pouvons le noter sur la Figure 3, la configuration angulaire des caméras n'est pas conventionnelle pour de la métrologie de PIV 3D. Les caméras sont placées dans un même plan, mais les caméras (#1 et #3) ont des angles de vue relativement faibles et peu différents. Ce choix est contraint par le positionnement des accès optiques et la nécessité de ne pas observer le volume suivant des directions trop proches entre les caméras. Afin de maintenir une zone d'observation commune suffisante entre les 4 caméras, des objectifs Nikkor de 135 mm ($f/d=2$) équipent les caméras (#1 et #3) alors que pour les caméras les plus désaxées (#2 et #4) disposent d'objectifs Nikkor 70-200mm ($f/d=2,8$) permettant un ajustement fin du grandissement. Avec ce dispositif, le champ de vision commun pour les 4 caméras est de 81mm en horizontal par 55mm en vertical. Les ouvertures des objectifs ont été ajustées à $f/d=5.6$ pour permettre une profondeur de champ supérieure à 10mm afin de minimiser le phénomène de flou sur les particules dans l'épaisseur du volume de mesure fixé par l'épaisseur de la zone éclairée par le laser. Il est à noter que pour chacun des 9 cas (3 Reynolds et 3 températures), 1 000 000 d'image ont été acquises à 20kHz en décalant temporellement de $50 \mu s$ les deux cavités laser fonctionnant individuellement à 10 kHz. La durée totale des enregistrements est ainsi de 50 secondes et l'intervalle de temps entre deux images successives est de $50 \mu s$ pour toutes les expériences. Cet intervalle de temps fixe entre les images et relativement court par rapport aux vitesses de l'écoulement, a été cependant maintenu constant

pour permettre d'appliquer des approches PIV intégrant le temps dans les algorithmes de mesures. Pour certain cas de la série, plusieurs hauteurs ont été enregistrées pour une description fine des phénomènes de la sortie du jet à la zone d'inversion chauffé de l'écoulement en haut du volume de confinement.

Pour appliquer la technique de PIV 3D, le jet estensemencé avec des particules de DEHS qui suivent pleinement la phase gazeuse. Grâce à l'écoulement retour, l'ensemble de la chambre de confinement estensemencé de façon uniforme.

Dans ce travail, les étapes d'acquisition des images et de traitement ont été réalisées sous le logiciel Davis 10 de la société Lavison.

3 Mesure de vitesse 3D

Avant de procéder au calcul des vitesses, deux étapes essentielles sont nécessaires. La première consiste à réaliser un pré-traitement des images afin de faciliter la détection des particules. La seconde permet de déterminer les modèles des caméras à l'aide d'une procédure de calibration.

3.1 Pré-traitement des images

Afin d'illustrer cette étape, un exemple d'enregistrement instantané par les quatre caméras du volume de particules éclairés par le laser est présenté sur la partie haute de la Figure 4. Sur ces images, nous pouvons noter plusieurs points pouvant conduire à limiter la qualité des mesures de vitesse. Le premier s'observe sur les caméras #2 et #4 par des zones de forte diffusion induite par des réflexions sur les parties métalliques de la chambre de confinement et par la trace de la nappe sur le hublot d'entrée. Malgré nos efforts, nous n'avons pas été en mesure de supprimer totalement ces diffusions lors de l'acquisition. Le deuxième point notable est l'absence d'image de

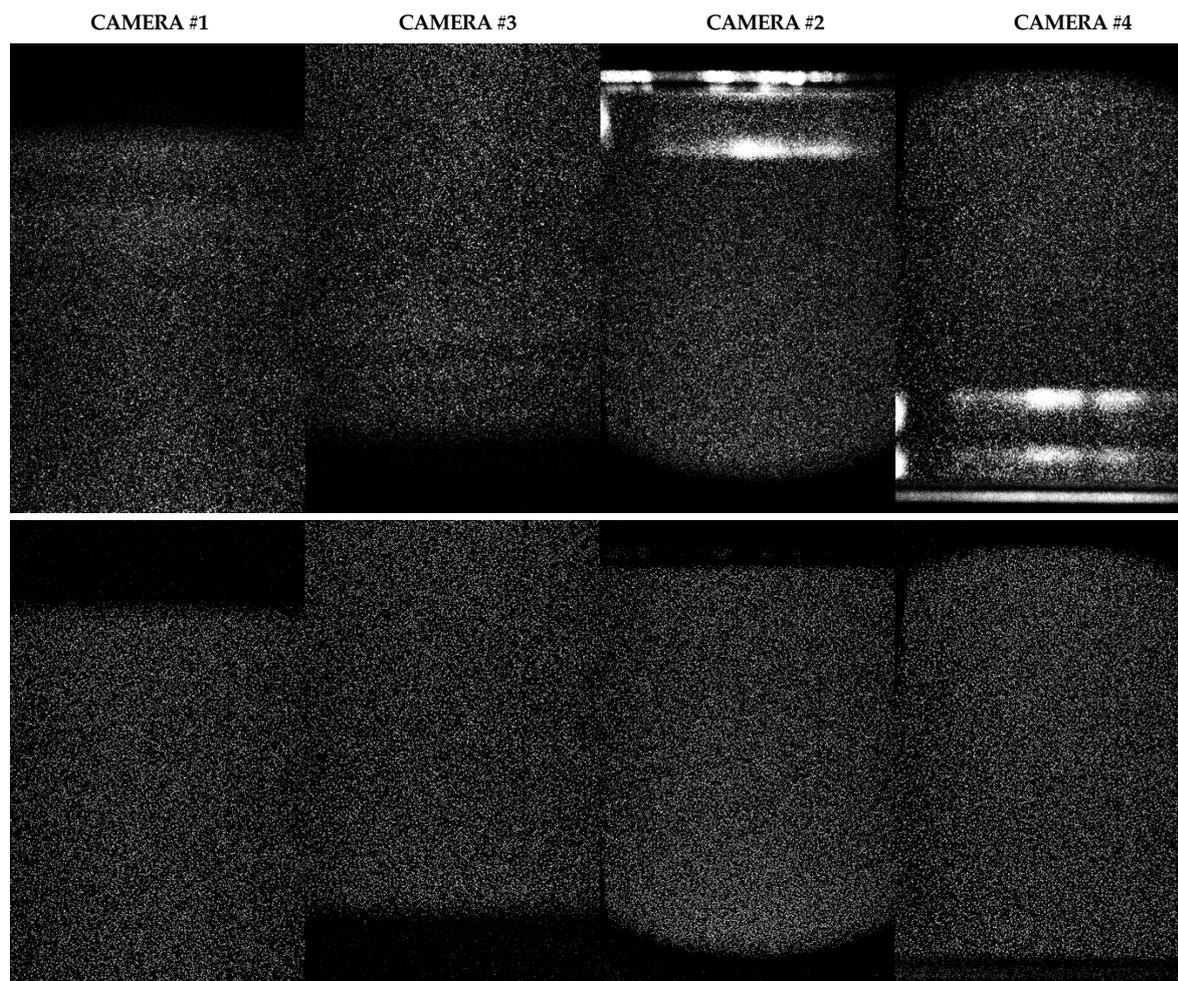


Figure 4 : Exemple d'image de particules sur les caméras #1, #2, #3 et #4 lors de l'enregistrement (haut) et après pré-traitement des images (bas)

particules dans certaines zones des images. L'origine de ces régions sans signal provient de deux sources différentes. Sur les 4 enregistrements, des zones sans signal et présentant une transition légèrement courbe avec les zones avec particule provient d'un blocage optique introduit par les montures Scheimpflug. Cet effet est plus prononcé sur les caméras #2 et #4 compte tenu de l'angle d'observation plus grand que pour les deux autres caméras et qui nécessite donc un angle de Scheimpflug plus important. Sur les caméras #2 et #4, à l'opposé de la zone de blocage des montures, nous constatons également une perte de signal due à la dimension limitée des hublots, et donc observée uniquement aux grands angles de collection. Ces absences de signal sur certaine partie des images réduisent ainsi légèrement le volume commun d'observation à de $81 \times 55 \times 8 \text{ mm}^3$. Afin de ne pas introduire d'erreur lors des mesures de vitesse, des masquages adaptés de ces zones sont effectués sur chacune des images des caméras.

Pour ce qui concerne la suppression des diffusions parasites et l'amélioration du contraste sur les images, un filtrage temporel est appliqué sur les images brutes. Ce procédé améliore considérablement la détection des particules, et tout particulièrement dans

les zones de forte diffusion. En bas de la Figure 4, nous pouvons voir le résultat de ce pré-traitement qui renforce le contraste et homogénéise la dynamique du signal des particules et supprime totalement les diffusions.

3.2 Procédure de calibration

L'étape de calibration pour les mesures de PIV 3D est très importante et doit atteindre des niveaux de précision supérieur à ce qui est requis pour la S-PIV. Dans notre cas, la calibration de notre système d'image débute l'aide du positionnement dans le volume de mesure d'une mire 3D double face (référence Lavision : 10-164). Cette première estimation des modèles de caméra est ensuite corrigé par une procédure de « self-calibration » pour optimiser les modèles des caméras réalisées à partir des 500 premières images de la série considérée. Cette étape de calibration est répétée très fréquemment soit partiellement en effectuant une « self-calibration » sur la série d'image analysée pour évaluer d'éventuelle dérive, soit en reprenant la procédure dès le début à partir de l'étape de pré-calibration avec la mire 3D. Dans notre configuration, l'une des inquiétudes lors de la mise en place de la PIV 3D était la présence de

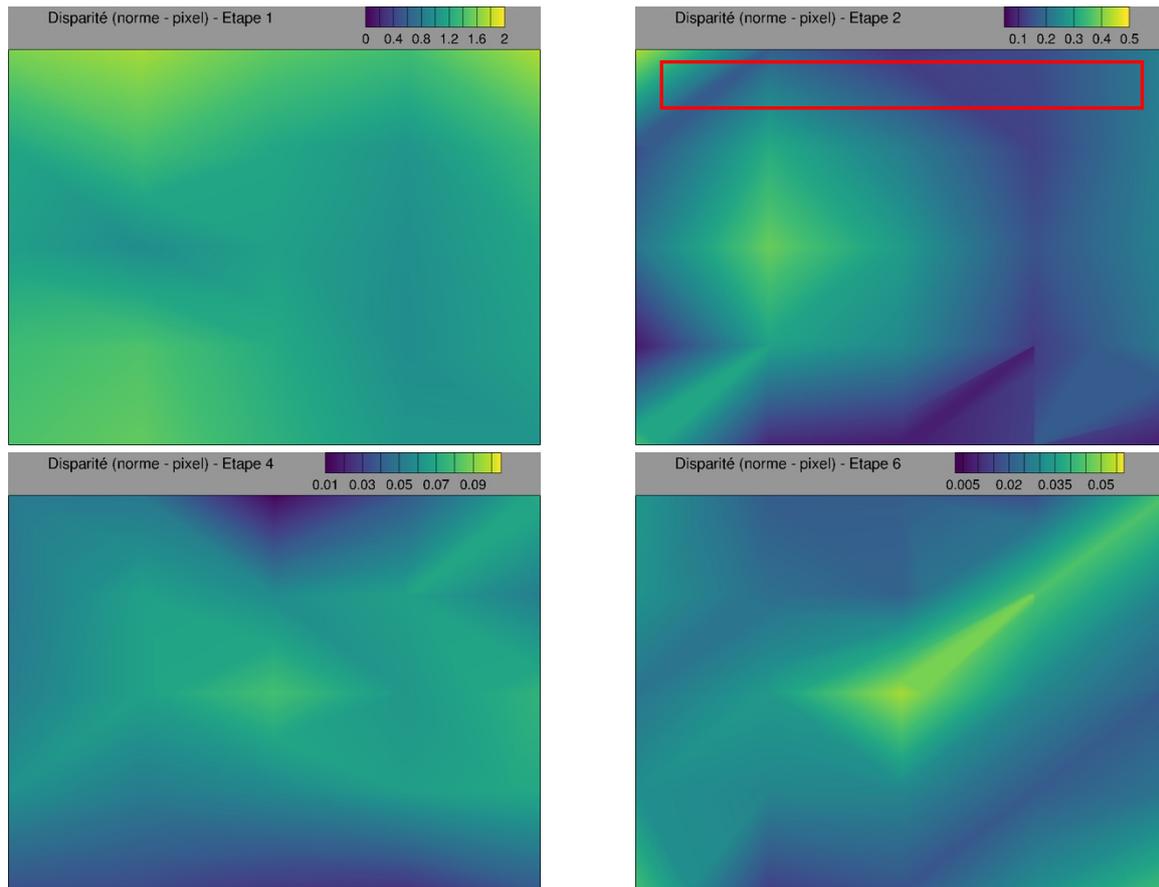


Figure 5 : Champ de disparité dans le plan central du volume pour la caméra #1 (étape 1, 2, 4 et 6)

Cas $Re = 8000$ et $T=80^{\circ}C$

variation de l'indice optique dans le confinement qui aurait pu provoquer des difficultés pour la calibration et le calcul des vitesses. Dans toute la gamme de conditions expérimentales que nous avons considérées (chauffage de $24^{\circ}C$ à $80^{\circ}C$), nous n'avons pas noté d'effet particulier du chauffage sur la qualité des mesures de vitesse. Cela rejoint les conclusions de Lecordier *et al.* 2012, où des mesures de tomo-PIV avaient été faites dans une flamme. Dans cette expérience, pour des températures de $24^{\circ}C$ à $80^{\circ}C$, nous obtenons des disparités toujours inférieures à 0,06 pixel après 6 étapes de raffinement de la procédure de « self-calibration ». Sur la Figure 5, nous présentons les cartographies de disparité pour la caméra #1 au centre du volume d'étude dans le cas le plus défavorable, c'est-à-dire pour un chauffage de $80^{\circ}C$. La première étape montre des disparités de l'ordre de 2 à 3 pixels, qui se réduisent très rapidement à chaque étape, pour atteindre après 6 itérations des valeurs inférieures à 0.06 pixels sur toutes les caméras. Ces très faibles valeurs de disparités sont parfaitement compatibles avec les méthodes de mesure de vitesse de type PIV 3D.

Lors de cette étape de calibration, nous avons également vérifié la distribution des tâches de diffusion des images de particule (Optical Transfer Function : OTF) en fonction de la température de

chauffage et le positionnement en profondeur dans le volume. En effet, un étalement trop important du signal des particules, entrainerait une perte de contraste et ainsi une difficulté évidente pour la détection des particules lors du traitement. Sur la Figure 6 est présenté pour les quatre caméras, la forme des tâches de diffusion pour le plan $z=-3.6mm$ et dans la zone matérialisée par le cadre rouge sur la Figure 5. Cette région, la plus défavorable pour notre système d'imagerie et dans les conditions $T=80^{\circ}C$, montre que l'OTF sur les quatre caméras restent très comparables. Sur les caméras #3 et #4, elles ne varient pratiquement pas sur la largeur du capteur. Sur les caméras #1 et #2, la dynamique et la largeur de la tâche de diffusion des

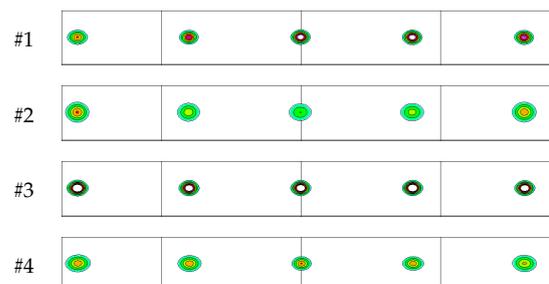


Figure 6 : Évolution de l'étalement du signal des images de particules dans le cadre rouge de la Figure 5 et pour la position $z=-3.6mm$ dans le volume de mesure

particules varient légèrement et peu présenter une très légère forme elliptique. Néanmoins ces variations de l'OTF sur la partie externe du volume de mesure restent très faibles et sont compatibles avec une détection fiable de la position des particules sur les images des quatre caméras.

3.3 Calcul des champs de vitesse

Pour les mesures de vitesse, compte tenu du fort taux d'échantillonnage de l'imagerie du champ de particules, nous avons opté pour une approche lagrangienne via le module « Shake the box » intégré dans le logiciel Davis de la société Lavis. Afin de pouvoir appliquer ce module, la concentration en particule d'ensemencement a été optimisée pour atteindre environ 50 000 particules dans le volume d'étude. Après ajustement des paramètres de ce module, l'extraction des mesures de vitesse a été faite sur des séries de 500 images. Sur la Figure 7 nous présentons les données statistiques du module « Shake the box » au cours de l'analyse de la série $Re=8000$ à $T=80^{\circ}C$. Nous pouvons noter qu'après les premières itérations, le nombre de particules « utilisables » sur nos images est d'environ 27 000 avec plus de 10 000 trajectoires analysées. A chaque nouvelle images, nous notons un renouvellement d'environ 1 000 trajectoires qui compensent la perte des trajectoires obtenues lors des étapes précédentes.

4 Résultats préliminaires

Sur la Figure 9 nous présentons trois champs de trajectoire extraits du module « Shake the box » pour le cas de plus forte vitesse ($Re = 8000$) et les trois températures de chauffage. Cette mesure est réalisée au centre de la chambre 95mm du haut de l'injecteur. Le jet se matérialise sans difficulté par les trajectoires rouges (forte vitesse ascensionnelle) sur la partie gauche des champs 3D. Sur la zone externe, nous avons des vitesses beaucoup plus faibles correspondant à la couche de mélange, mais également à la redescende de l'écoulement après impact du jet sur le haut du confinement.

Ces premières observations ont pu mettre en évidence la qualité de reconstruction des champs de trajectoire 3D pour les différents cas étudiés. Par exemple, sur celui présenté, nous pouvons observer que pour le cas le plus froid ($T=24^{\circ}C$), la zone externe du jet est bien définie avec des tourbillons réguliers dans la zone de cisaillement du jet. En revanche, pour les deux températures supérieures ($T=50^{\circ}C$ et $T=80^{\circ}C$), nous constatons que sur la bordure du jet, il apparaît des structures moins régulières qui semblent ressembler à ce qui avait été observé par Voivenel et al. 2017 dans des jets à densité variable. Pour la température la plus élevée, la zone de cisaillement est fortement perturbée. Afin d'essayer de mieux appréhender ces phénomènes, deux champs de vitesse Lagrangiens 3D instantanés à $T=24^{\circ}C$ et $T=80^{\circ}C$ ont été reprojétés sur

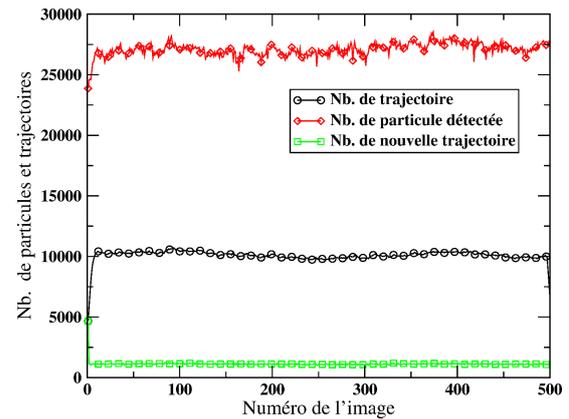


Figure 7 : Évolution des paramètres de détection de particule et des trajectoires de l'algorithme « Shake the box » pour les 500 premières images

un maillage régulier par une méthode simple de pondération par l'inverse de la distance entre le nœud et la particule considérée. Comme le montre la Figure 8, cette reconstruction Eulérienne, même basique, permet une meilleure visualisation de la zone du jet et de la vitesse dans sa partie centrale, mais également à l'aide des lignes de courants, une meilleure visualisation de la structure instantanée de l'écoulement. Comme observé sur les trajectoires de la Figure 9, le cas de plus faible température présente des tourbillons régulièrement organisés dans la zone de cisaillement avec sur la droite du champ une redescende de l'écoulement externe. En revanche pour le cas le plus chaud ($T=80^{\circ}C$), l'organisation de l'écoulement semble plus complexe que le cas à froid.

A partir de ces illustrations préliminaires de la structure 3D de l'écoulement dans notre contre-courant chauffé, nous pensons que l'analyse complète de l'ensemble des 9 cas enregistrés à différentes hauteurs sera véritablement essentiel pour améliorer notre compréhension du mélange dans des écoulements à densité variable. L'exploitation de l'information temporelle sera également primordiale pour cette étude.

5 Conclusions

Dans cette étude nous avons présenté la mise en place d'une méthode de PIV 3D résolue temporellement pour l'analyse d'un jet confiné inversé d'air impactant sur une paroi chauffée. Les différentes étapes de validation de la méthode de PIV 3D ont été validées minutieusement afin de s'assurer de la qualité des mesures de vitesse : pré-traitement des images, calibration et optimisation des mesure de vitesse. Les deux difficultés majeures de cette étude étaient des accès optiques limités ne permettant pas d'avoir une configuration optimale pour l'agencement des quatre caméras, et la présence de variation d'indice dans la chambre de confinement induites par le chauffage. A la vue des premiers résultats de mesure de PIV 3D, il

semble que ces difficultés n'ont que très peu entachés la qualité des mesures de vitesse volumique.

Une large base de données pour 3 cas de vitesse, 3 températures et plusieurs hauteurs a été acquise sur des durées longues. Elle fera l'objet d'un dépouillement complet et d'une analyse plus poussée dans les mois à venir.

6 Remerciements

Le soutien financier de l'Agence Nationale de la Recherche Française, dans le cadre du projet "EMCO2Re", est vivement remercié. Ce projet a été soutenu par le Conseil Régional de Normandie au travers des appels à projets RIN (RIN HYBRID).

7 References

- [1] F. Risso, J. Fabre, Diffusive turbulence in a confined jet experiment, *Journal of Fluid Mechanics* 337, 233-261, 1997.
 - [2] S. Kruse, B. Kerschgens, L. Berger, E. Varea, H. Pitsch, Experimental and numerical study of MILD combustion for gas turbine applications *Applied energy* 148, 456-465, 2015.
 - [3] R. A. Antonia and Q. Zhao, Effects of initial conditions on a circular jet. *Experiments in Fluids* 31, 319_323, 2001.
 - [4] L. Voivenel, E. Varea, L. Danaila, B. Renou, M. Cazalens, Variable viscosity jets: Entrainment and mixing process, *Whither Turbulence and Big Data in the 21st Century*, 147-162, 2017
- B. Lecordier, C. Gobin, C. Lacour, A. Cessou, B. ; Tremblais, L. Thomas, L. David - Tomographic PIV study of lifted flames in turbulent Axisymmetric jets of methane - 16th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics Lisbon, Portugal, 09-12 July, 2012

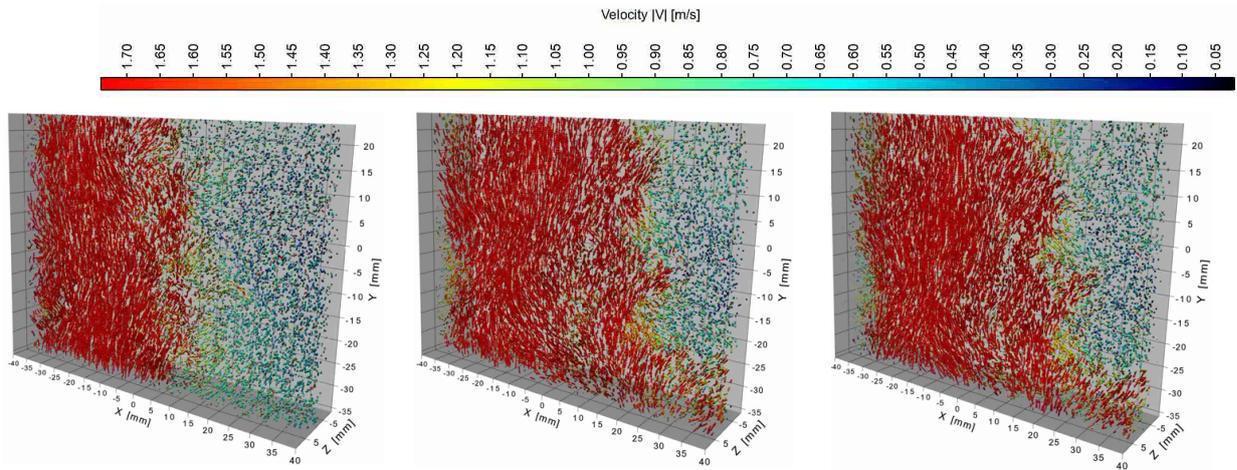


Figure 9 : Trajectoires de l’algorithme « Shake the box » pour le cas $Re = 8000$ pour un chauffage à $T = 24^\circ\text{C}$ (Gauche), $T = 50^\circ\text{C}$ (centre) et $T = 80^\circ\text{C}$ (droite)

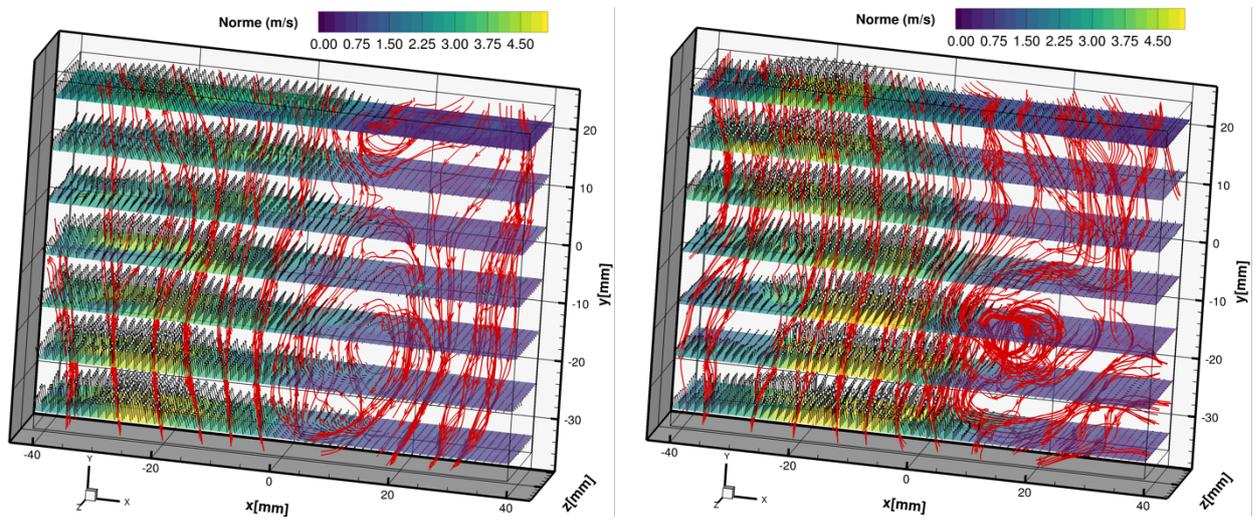


Figure 8 : Projection sur un maillage régulier de deux champs instantanés à $Re = 8000$ pour $T = 24^\circ\text{C}$ (gauche) et $T = 80^\circ\text{C}$ (droite)