

Régimes de combustion dans les foyers aéronautiques : mise en place expérimentale de l'écoulement diphasique

M. Vicentini, R. Lecourt, O. Rouzaud, V. Bodoc, Olivier Simonin

▶ **To cite this version:**

M. Vicentini, R. Lecourt, O. Rouzaud, V. Bodoc, Olivier Simonin. Régimes de combustion dans les foyers aéronautiques : mise en place expérimentale de l'écoulement diphasique. 14ème Congrès Francophone de Techniques Laser (CFTL 2014), Sep 2014, MARSEILLE, France. hal-01071630

HAL Id: hal-01071630
https://onera.hal.science/hal-01071630

Submitted on 6 Oct 2014

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.

REGIMES DE COMBUSTION DANS LES FOYERS AERONAUTIQUES : MISE EN PLACE EXPERIMENTALE DE L'ECOULEMENT DIPHASIQUE

Maxime Vicentini [*,a], Renaud Lecourt [a], Olivier Rouzaud [a], Virginel Bodoc [a], Olivier Simonin [b]

(a) Office National des Etudes et Recherches Aérospatiales, DMAE, 31000, Toulouse, France
(b) Institut National Polytechnique de Toulouse, 31029, Toulouse, France

*Correspondant: maxime.vicentini@onera.fr

Mots clés : régimes de combustion, diphasique, moyenne de phase, PIV, imagerie rapide, PDA

Introduction

Contexte.

De nos jours, la combustion diphasique – injection de carburant liquide dans un foyer – est très largement répandue dans de nombreuses applications (turboréacteurs, moteurs-fusées, moteurs automobiles, fours industriels). Lorsque la théorie de l'évaporation des gouttes de carburant a été élaborée, s'est naturellement posée la question de savoir, si, dans un brouillard, les gouttes se consumaient individuellement ou en paquets. Chiu [1] et Chigier [2] ont introduit l'idée qu'il puisse exister différentes structures de flammes au sein d'un nuage de carburant présentant une distribution spatiale hétérogène de gouttes. La compréhension phénoménologique des régimes de combustion de brouillard de gouttes pourrait être essentielle en vue d'optimiser les systèmes d'injection et l'architecture des chambres de combustion. Par la suite, de récents travaux ont montré l'influence de certains régimes de combustion sur la production d'oxyde d'azote [3].

Objectifs de la Présente Etude.

En vue d'améliorer la modélisation de la combustion diphasique dans les solveurs CFD actuels, l'ONERA souhaite mettre en évidence, expérimentalement, l'existence ou non des différents régimes de combustion. Il s'agirait de proposer une cartographie de ces régimes au moyen de grandeurs physiques et/ou de nombres adimensionnels. Pour y parvenir, un nouveau moyen d'essais, le montage PROMÉTHÉE *(figure 1)*, spécifiquement dédié à cette problématique, a été conçu. L'objet de cette présente étude est la caractérisation de l'écoulement diphasique en conditions non-réactives à l'aide de techniques laser (PIV, imagerie rapide, PDA). L'un des points importants de ce travail consiste en la mise en place et la validation du conditionnement de mesures afin d'effectuer des traitements statistiques de type « moyenne de phase ».

Investigation expérimentale

Concept et Design du Montage Expérimental.

Le dispositif étudié consiste en un « montage de similitude » représentant une chambre de combustion de turboréacteur. Il s'agit d'un écoulement de canal d'air turbulent. L'air, issu d'un réseau de compression de 80 bars, est détendu et réchauffé pour reproduire un fonctionnement moteur à pression atmosphérique. Cet air est ensuite conditionné par différents étages de redresseurs et de grilles de turbulence. Un système d'injection de carburant liquide de type « flat spray » est placé à l'intérieur de la veine d'essais afin de générer un brouillard de gouttes vers l'aval dans le plan médian. Le système d'injection est monté sur un obstacle. Grâce à sa forme particulière, l'obstacle engendre naturellement une zone de recirculation et un régime oscillatoire de détachement tourbillonnaire, principalement aux grandes échelles. La zone de recirculation permet l'accrochage aérodynamique d'une flamme, tandis que les structures tourbillonnaires dispersent les gouttes et les mélangent avec l'air *(figure 2)*.

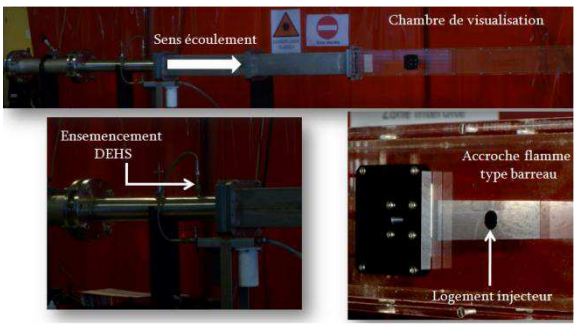


figure 1 : Présentation du prototype PROMÉTHÉE

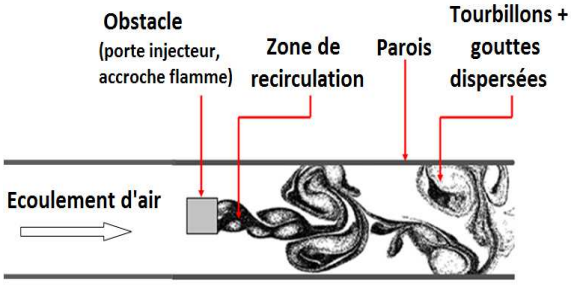


figure 2 : Structure de l'écoulement

La principale différence entre le banc d'essais présenté en [3] et ce montage réside dans la « bi-dimensionnalité » de l'écoulement. En effet, pour être mieux adaptée aux diagnostics optiques et pour s'affranchir des phénomènes complexes associés aux flammes stabilisées par un écoulement swirlé, la configuration a été dessinée de manière à être la plus « bidimensionnelle » possible. Toutefois, les résultats restent transposables à un foyer aéronautique réaliste car la configuration reproduit les principales caractéristiques des écoulements rencontrés dans ces foyers : carburant similaire au kérosène, brouillard de gouttes polydisperse, gamme de richesse, zone de recirculation, échelles de turbulence, confinement.

Conditions d'Essais en Ecoulement Non-Réactif.

Le montage PROMÉTHÉE est alimenté par deux lignes distinctes, l'air et le carburant.

Le débit d'air est contrôlé par un col sonique à aiguille. Celui-ci est muni de capteurs analogiques calibrés (pression, température, déplacement aiguille). Ils permettent, au moyen d'une corrélation, d'estimer le débit d'air à 1% près. Tous les essais présentés ici correspondent à une vitesse débitante de 6 m/s dans la chambre de visualisation de forme parallélépipédique carrée 120x120 mm².

Pour les essais en non-réactif, l'éthanol (95%) est retenu comme fluide de similitude au kérosène. Ses propriétés physico-chimiques sont relativement identiques dans les conditions d'essais définies ; notamment la tension de surface (2,3 mN/m) et la viscosité dynamique (1,2 mPa.s) qui jouent des rôles importants dans les phénomènes d'atomisation. Le débit massique de carburant est mesuré par un débitmètre à effet Coriolis étalonné de la marque Micro Motion. Sa précision est d'environ 0,2% de la mesure. L'injecteur est alimenté en carburant par un réservoir pressurisé à l'air sous 7 bar. Les paramètres retenus sont résumés dans le *tableau A*.

Quantité	Valeur	Commentaire
PHASE GAZEUSE		
T_{air}	298 K	Température veine
p_{air}	1 bar	Pression veine
$\dot{m_{air}}$	98 g/s	Débit air (6 m/s)
Re_D	50 000	Diamètre hydraulique
PHASE DISPERSÉE		
Carburant	C_2H_6O	
T_{carb}	298 K	Température carburant
$\dot{m_{carb}}$	0,9 g/s	Débit injection
$\Phi_{eq,JETA-1}$	0,14	Richesse éq. kérosène

tableau A- Conditions opératoires du montage PROMÉTHÉE

Choix de la Géométrie d'Accroche-Flamme.

Le premier travail a consisté à définir la forme de l'obstacle servant d'accroche-flamme.

Dans la littérature, il existe un grand nombre de travaux au sujet d'écoulements turbulents dans lesquels un obstacle génère des lâchers de structures tourbillonnaires qui sont convectés vers l'aval [4]. Ces études sont souvent, elles-mêmes, rattachées à la problématique des débitmètres à vortex. Par le passé, différentes géométries ont été examinées. Il s'agissait d'optimiser la précision de ces appareils et d'estimer le mieux possible la corrélation entre la fréquence connue et le débit recherché. De plus, l'objectif était de garantir leur fiabilité sur la plus large plage de nombre de Reynolds en ayant un phénomène de détachement tourbillonnaire aussi régulier que possible.

En général, il a été observé que les obstacles présentant des arêtes vives favorisaient le développement de structures plus stables, plus cohérentes [4]. En revanche, l'obstacle de type cylindre, par exemple, génère des instabilités supplémentaires, au niveau de la couche limite et dans la couche de cisaillement. C'est pourquoi cette géométrie n'a pas été retenue.

Les trois formes retenues sont les obstacles rectangulaire, triangulaire et trapézoïdal. L'accroche-flamme rectangulaire a été souvent employé dans les études portant sur les statoréacteurs. L'obstacle triangulaire a été retenu car il s'apparente à l'accroche-flamme « V-Gutter » utilisé notamment pour la postcombustion des avions supersoniques. Le trapèze, à faible angle de découpe (4°), fait également l'objet de cette étude paramétrique car c'est une géométrie courante dans les débitmètres à vortex.

En plus de la géométrie, différents rapports de blocage ont été testés (*figure 3*).

Le rapport de blocage est défini par la formule *(eq. 1)* :

$$\beta = \frac{Ao}{A} \quad (eq.1)$$

où *Ao, A* sont respectivement la surface maître-couple de l'obstacle et la section de passage de la veine d'essais.

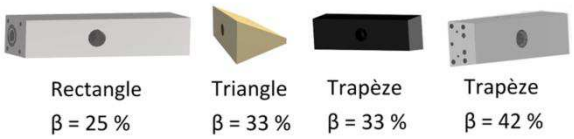


figure 3 : Différents accroche-flammes étudiés

Les obstacles ont été percés sur leur face supérieure et inférieure de trous de pression (1,7 mm de diamètre). Les trous sont reliés à des canaux à l'intérieur de l'obstacle. Ces canaux permettent l'établissement d'une pression hydrostatique. Celle-ci remonte vers un capteur de pression différentielle de type capteur à membrane Validyne P305D avec une sensibilité ± 0,86 kPa.

Lors du régime oscillatoire de détachement tourbillonnaire, une différence de pression est mesurée par le capteur. Le signal résultant est alternatif et idéalement périodique.

Pour chacun des accroche-flammes, des analyses spectrales sont réalisées sur le signal de pression. Dans un premier temps, un analyseur de spectre temps réel B&K permet de vérifier que l'écoulement est stabilisé. Ensuite, le signal est enregistré, pendant une durée de 750 s, via un boîtier NI BNC-209 (22 voies), sur une carte d'acquisition PCI-MOI- 16E-1. L'analyseur de spectre détecte le détachement tourbillonnaire entre 20 et 50 Hz pour les accroche-flammes retenus. La fréquence d'échantillonnage étant fixée à 2000 Hz, le critère de Nyquist-Shannon est donc largement respecté.

Sur les *figures 4, 5, 6, 7* sont données les densités spectrales normalisées par leur amplitude maximale. Pour chaque spectre, il existe un sommet de fréquence. Ce sommet peut-être associé à un nombre de Strouhal (Sth). Physiquement, le nombre de Strouhal représente le rapport du temps d'advection et du temps caractéristique de l'instationnarité. Il est défini comme suit :

$$\mathrm{Sth} = \frac{f\ Ho}{Udeb} \quad (eq.2)$$

où *f, Ho, Udeb* sont respectivement le pic de fréquence correspondant à l'émission des tourbillons, la hauteur de l'obstacle et la vitesse débitante (6 m/s).

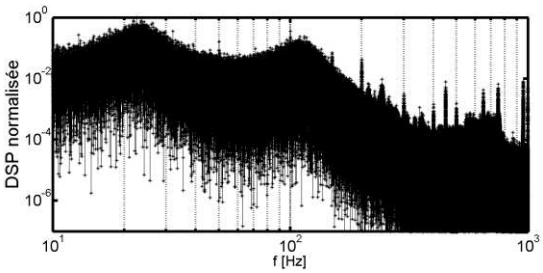


figure 4 : Densité spectrale de puissance normalisée – Rectangle, β = 25 % - Sth = 0,11

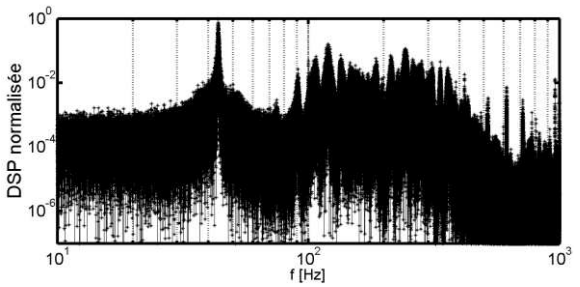


figure 5 : Densité spectrale de puissance normalisée – Triangle, β = 33 % - Sth = 0,29

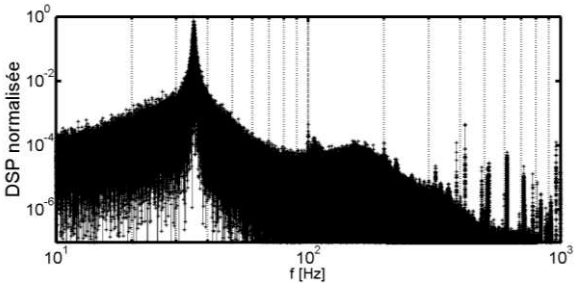


figure 6 : Densité spectrale de puissance normalisée – Petit trapèze, β = 33 % - Sth = 0,24

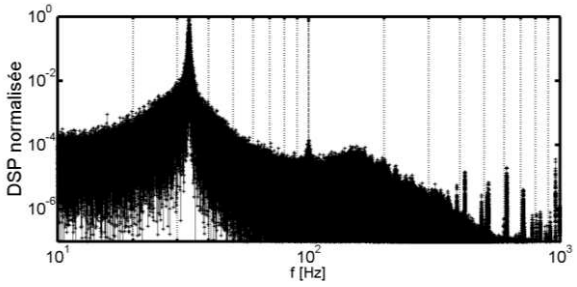


figure 7 : Densité spectrale de puissance normalisée – Grand trapèze, β = 42 % - Sth = 0,28

Le spectre de l'obstacle rectangulaire exhibe deux sommets d'énergie prédominants. Le premier est centré autour de 23 Hz, le second autour de 100 Hz. Au vue de leur largeur, il ne s'agit pas, à proprement parlé de pics de fréquence. De surcroît,

cette géométrie entraîne d'importants écart-types de fluctuations de fréquence principale. Elle n'est donc pas retenue.

Le spectre de l'accroche-flamme triangulaire est très différent du précédent. Cette fois, un pic de fréquence, autour d'un nombre de Strouhal égal à 0,29, ressort plus nettement. En revanche, cette géométrie produit encore un bruit excessif pour des fréquences supérieures à 100 Hz.

Pour la géométrie du trapèze, les deux spectres sont très similaires. Il existe, dans ce cas, un très bon rapport signal sur bruit. La géométrie trapézoïdale est donc retenue pour cette étude. Le trapèze ayant le rapport de blocage le plus important ($\beta = 42\%$) est toutefois préféré. Celui-ci devrait rendre l'accrochage d'une flamme plus aisé en générant une zone de recirculation plus allongée que le petit trapèze.

Algorithme pour le traitement conditionnel.

L'application simultanée, *stricto sensu*, de plusieurs techniques laser est une tâche difficile, voire impossible (encombrement, accès optique, …). C'est pourquoi, l'un des points importants de ce travail consiste en la mise en place et la validation du conditionnement de mesures par rapport à un signal de référence. En effet, à partir d'une analyse fréquentielle, des moyennes de phase peuvent être réalisées afin de caractériser l'instationnarité de l'écoulement. En outre, il permet de superposer / synchroniser, *a posteriori*, différentes mesures optiques.

Dans cette étude, deux signaux permettent de conditionner les mesures. Le premier signal est enregistré par le capteur Valydine pendant les essais, en parallèle des mesures optiques. Ce signal correspond aux fluctuations de pression causées par les lâchers tourbillonnaires de part et d'autre de l'obstacle. Le deuxième est un signal obtenu lors du post-traitement des images. Il s'agit, dans ce cas, des fluctuations de luminance causées par des variations locales en concentration du traceur d'ensemencement ou des gouttes de carburant.

Quel que soit le signal brut, le même algorithme est utilisé. Une transformée de Fourier est appliquée au signal temporel, auquel a été retranchée sa valeur moyenne (signal sans composante continue). Au pic d'amplitude de la FFT correspond sa fréquence principale ; par exemple la fréquence des allées de Von Karman. Le signal contenant également d'autres fréquences, il est nécessaire de les éliminer afin d'obtenir un signal de référence exploitable. Dès lors, le choix d'un filtre de post-traitement s'impose. La donnée la plus importante étant la phase, il faut choisir un filtre n'introduisant aucun décalage temporel. Une autre spécificité attendue est d'avoir un filtre ayant un gain aussi constant que possible dans sa bande passante pour minimiser les pertes d'informations. Pour ces raisons, un filtre passe-bande Butterworth d'ordre 2 est préféré. Le filtre est centré sur la fréquence principale et limité à une bande de ± 5% autour de celle-ci.

Le but de ce traitement est d'obtenir un signal filtré où les passages à zéro sont plus faciles à déterminer. Les passages à zéro sont estimés lors de la phase montante (passage du signe négatif au signe positif) par une interpolation linéaire du premier ordre. Ce sont ces passages à zéro qui définissent le temps zéro des cycles. L'intervalle entre deux de ces passages à zéro correspond à la période instantanée d'un cycle. Lorsqu'une image de l'écoulement est prise, un signal TTL est enregistré par la carte d'acquisition. La détection du front montant permet d'associer chaque image à son temps d'apparition. Une comparaison entre le temps d'apparition et deux passages à zéro consécutifs, encadrant l'arrivée de cet événement, permet d'y associer une valeur de phase φ comprise entre 0 et 360°.

Une fois ce classement en phase réalisé, il est aisé de procéder à des traitements statistiques de type « moyenne de phase », i.e. toutes les images appartenant à l'intervalle $\varphi \pm \Delta\varphi$ sont moyennées pixel à pixel pour qu'il en résulte une seule image. Le paramètre $\Delta\varphi$ est essentiel. Il pilote, d'une part, la précision d'attribution de phase et, d'autre part, le nombre d'images utiles pour effectuer des moyennes.

Mesures de Vélocimétrie par Imagerie des particules (PIV) et leur validation.

Sur la configuration choisie, des mesures PIV 2C (Vélocimétrie par Images de Particules à deux composantes) ont été effectuées. Le post-traitement des mesures permet d'accéder aux champs et aux profils de vitesses (moyennes temporelles, moyennes de phase, partie fluctuante) de l'écoulement. Le signal du capteur de pression est utilisé pour le conditionnement des mesures.

Description du Dispositif PIV 2C

Le dispositif de mesures PIV 2C est constitué d'une source de lumière, d'un générateur de nappe, d'un système d'acquisition d'images et de synchronisation de données LaVision, et d'un ensemenceur. La source de lumière provient de deux lasers de classe IV pulsés Nd :Yag (2,5 Hz, λ = 532 nm). Ces lasers fournissent une énergie de 250 mJ par pulse pendant une durée d'environ 8 ns. La période de temps entre deux impulsions laser (Δt) est réglée à 30 µs. Le système optique utilisé pour générer la tranche laser est constitué d'un jeu de lentilles cylindriques convergentes et de miroirs. La nappe laser résultante possède une largeur de 100 mm et

une épaisseur d'environ 1 mm. La nappe laser traverse la manchette dans son plan médian. Une caméra CCD de résolution 2048x2048 px² est placée perpendiculairement à la tranche laser. Un objectif CANON d'une focale de 60 mm est utilisé. Après étalonnage sur une mire, la résolution est estimée à 17,6 px/mm. De même que pour les lasers, la caméra est reliée au système de synchronisation.

Le dernier élément est le générateur de gouttelettes. Il s'agit d'un atomiseur DEHS/air permettant d'ensemencer l'écoulement porteur d'un brouillard de fines gouttelettes (< 5 µm de diamètre). L'aérosol formé se comporte alors comme un traceur.

Traitement du Flot Optique

Le traitement d'images est réalisé grâce à l'algorithme FOLKI-SPIV développé à l'ONERA [5]. Cet algorithme permet une estimation précise d'un flot optique dense en minimisant la différence quadratique entre deux images consécutives. Sa technique consiste en un recalage de fenêtres de type Lucas-Kanade itératif et multi-résolution. Une autre caractéristique importante est sa structure hautement parallèle permettant de profiter pleinement de la puissance et de la rapidité des processeurs graphiques (GPU) [5].

Pour cette étude les paramètres principaux sont les suivants :

- nombre d'itération = 5
- nombre de niveau pyramidal = 3
- taille de fenêtre d'interrogation (Diw) = 31 px
- interpolation bilinéaire

Plans de Mesures

On s'intéresse ici uniquement aux plans de mesures médians à la veine d'essais. Deux plans de mesures, de largeur 100 mm chacun, sont étudiés à l'aval de l'obstacle. Les plans ont un taux de recouvrement de plus de 15% pour permettre une superposition des champs lors du post-traitement. A noter que par convention, la composante longitudinale U de la vitesse est selon l'abscisse X, tandis que la composante transversale V est selon l'ordonnée Y.

Histogramme de Vitesses

Pour juger de la qualité des mesures PIV, un histogramme des vitesses est obtenu sur 1880 images, en aval de l'accroche-flamme, à l'abscisse X = 63 mm (*figure 8*).

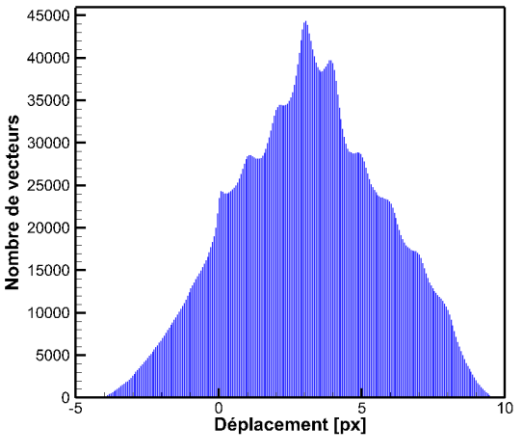


figure 8 : Densité de probabilité des vecteurs $\vec{U}$ en fonction des déplacements de particules - X = 63 mm

L'histogramme est une fonction gaussienne dont l'espérance mathématique correspond à un déplacement moyen de 3 px. Un critère courant est de vérifier que le déplacement des particules reste inférieur ou égal au quart de la taille de fenêtre d'interrogation (Diw) [6]. Dans le cas présent, le critère de déplacement est toujours respecté. Il reste adapté à des zones dans lesquelles les vitesses atteignent 15 m/s.

L'enveloppe de l'histogramme présente des petites oscillations avec une période de 1 px. Ce phénomène est typique d'un blocage de pic (peak-locking), récurrent dans ce genre de mesures. Ici, le phénomène existe mais n'est pas prononcé car il n'y a pas d'absence totale de mesure au voisinage des valeurs proches du demi-pixel. La qualité des données est donc satisfaisante.

Caractérisation de l'Ecoulement Amont Stationnaire.

L'écoulement en amont de l'obstacle est caractérisé à partir d'un lot de 1000 images. La *figure 9* représente le profil de vitesse longitudinale en fonction de la hauteur de la veine d'essais. Une légère dissymétrie peut être observée entre le haut et le bas de la veine d'essais (inférieure à 2 % en amplitude).

Cette dissymétrie disparaît en aval de l'obstacle. L'accélération de l'écoulement, provoquée par un effet de blocage important (β = 42%), rend le profil de vitesse en aval de l'obstacle peu sensible aux conditions amont [4].

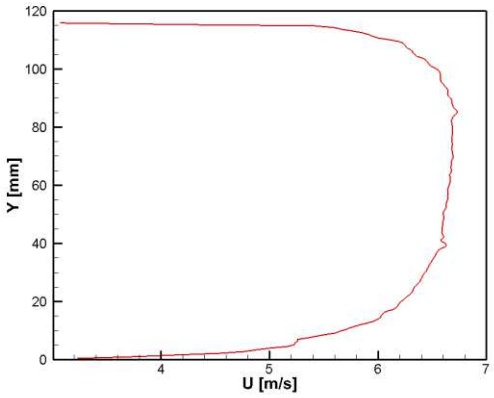


figure 9 : Profil U, amont stationnaire

L'intensité de turbulence est calculée comme le rapport de la vitesse longitudinale fluctuante (0,27 m/s) sur la vitesse débitante moyenne (6 m/s). Par conséquent, l'intensité turbulente vaut 4,5 %. Il s'agit donc d'une turbulence moyenne.

Précision Dans l'Attribution des Phases.

Les traitements statistiques de type « moyenne de phase » consistent à moyenner toutes les images appartenant à la classe de phase φ ± Δφ. Le choix du paramètre Δφ vient du compromis entre la précision d'attribution des phases et le nombre d'images à moyenner.

Dans cette partie, on compare les profils de vitesse obtenus avec différentes valeurs de Δφ en maintenant le nombre d'images moyennées à 100 images. Sur la *figure 10*, le profil de vitesse longitudinale correspond à la phase 45° ± Δφ, en aval de l'accroche-flamme, à l'abscisse X = 63 mm.

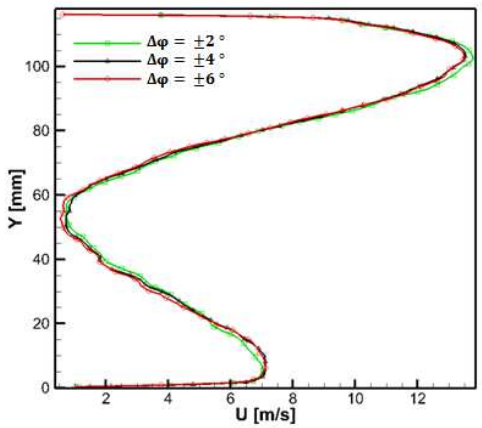


figure 10: Profil U, 45 ± Δφ, 100 images, aval, X = 63 mm

On constate une différence de vitesse de part et d'autre du sillage de l'obstacle. Pour la phase 45°± Δφ, cette différence produit une zone de cisaillement accompagnée d'un enroulement tourbillonnaire dans le sens horaire. Le phénomène étant périodique, la différence de vitesse s'alterne progressivement au cours des phases du cycle jusqu'à l'apparition d'un tourbillon contrarotatif.

L'influence du paramètre Δφ ne semble pas significative sur les profils de vitesse moyenne *figure 10*. En revanche, plus Δφ est grand, plus l'écart-type entre les images est important et plus l'intensité de turbulence est artificiellement augmentée. Par exemple, pour Δφ = ± 4°, l'intensité turbulente (intégrée sur la hauteur de la veine d'essais) est augmentée d'environ 6 % par rapport au cas Δφ = ± 2°. Toutefois, pour une même séquence d'acquisition il y aura deux fois plus d'images utiles par classe de phase dans le cas Δφ = ± 4°. C'est pourquoi cette valeur est préférée.

Influence du Nombre d'Images Sur la Convergence.

Maintenant que le paramètre Δφ est fixé, il s'agit de savoir à partir de combien d'images la convergence statistique est atteinte. Le profil de vitesse longitudinale correspondant à la phase 45° ± 4° est tracé *figure 11*. Le tenseur de Reynolds associé au profil précédent est représenté *figure 12*.

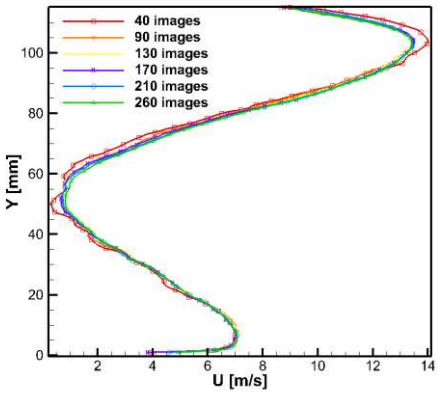


figure 11 : Profil U, 45 ± 4°, N images, aval, X = 63 mm

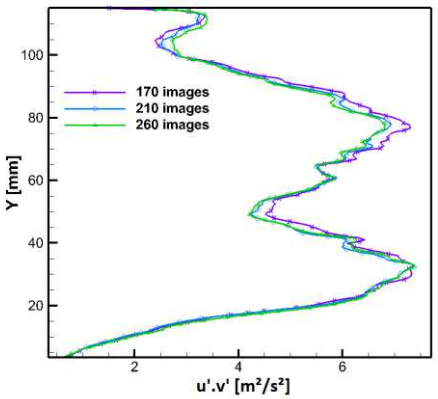


figure 12 : Tenseur de Reynolds, 45 ± 4°, N images, aval, X = 63 mm

La convergence est atteinte rapidement sur les profils de vitesse moyenne ; à partir d'une centaine d'images. En revanche, pour une bonne estimation des parties fluctuantes, le double d'images est nécessaire. Par la suite, pour réaliser les moyennes de phases, le nombre minimal d'images est fixé à 200.

Champs Obtenus en Vélocimétrie par Imagerie des Particules (PIV).

Les séquences d'images exposées *figure 13* représentent l'évolution des champs de vecteurs en fonction du cycle de détachement tourbillonnaire. Le cycle est découpé en 8 phases φ. Chaque image de phase est obtenue en moyennant 240 images appartenant à la classe φ ± Δφ associée. La précision Δφ est de ± 4°. La convergence statistique des données est assurée. Pour obtenir ce résultat, près de 11 000 images par plan ont été nécessaires, soit un peu plus d'une heure d'acquisition à 2,5 Hz.

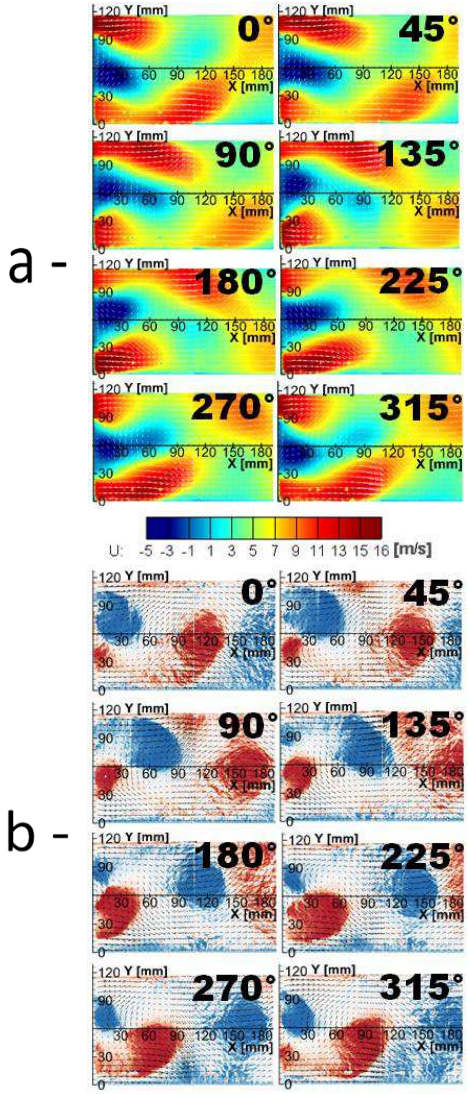


figure 13 : Moyennes de phases (a : profils U, b : critère Γ₂)

Sur la *figure 13-a*, l'écoulement, présente bien une zone de recirculation centrale dans le sillage de l'obstacle (vitesses négatives ou nulles). Sa longueur varie au cours du battement. Sa longueur moyenne vaut 1,14 fois la hauteur du trapèze, soit 57 mm. Sur la *figure 13-b*, le critère Γ₂ de Graftieaux [7] permet d'identifier les structures tourbillonnaires aux grandes échelles. Conformément aux prédictions, des tourbillons contrarotatifs sont générés de manière périodique. Durant leur phase de développement, on observe une dilatation puis une accélération des vortex vers l'aval, jusqu'à une vitesse de convection proche de la vitesse débitante.

Caractérisation de l'Injecteur.

L'injecteur de carburant liquide « flat spray » (pulvérisateur à jet plat) présente des caractéristiques intéressantes pour cette étude. Ce type d'injecteur à pression permet notamment d'obtenir une atomisation rapide, dans le but de réaliser des mesures fiables à proximité de la tête d'injection. Le jet plat est particulièrement bien adapté pour une configuration « bidimensionnelle » comme le montage PROMÉTHÉE. Enfin, l'atomiseur génère un brouillard de gouttes polydisperses (10 à 150 µm). Diamètre de Sauter : D32 = 55 µm. Diamètre moyen : D10 = 22 µm.

Comme l'illustre la *figure 14*, le brouillard de gouttes a une forme elliptique avec un grand axe d'angle 150° et un petit axe d'angle 25°. L'injecteur est placé de sorte que le grand axe de l'ellipse soit parallèle à la hauteur de la veine d'essais.

Les mesures PDA (Vélocimétrie et Granulométrie par Phase Doppler) présentées *figure 14* ont été faites dans un plan de mesure à 10 mm de la tête d'injection.

La distribution en taille de gouttes est relativement symétrique de part et d'autre de l'axe d'injection. Cette symétrie s'observe également sur les profils de vitesse. Statistiquement, les grosses gouttes sont localisées en périphérie du brouillard alors que les plus petites sont au centre. Près de l'injecteur, les petites gouttes exhibent une vitesse longitudinale d'éjection plus importante que les grosses.

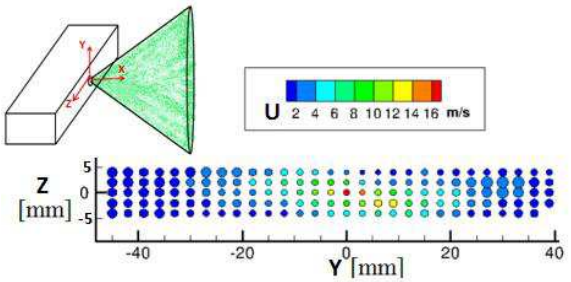


figure 14 : Vélocimétrie (couleur), granulométrie (taille)

Visualisations Tomographiques par Caméra Rapide.

Des visualisations tomographiques par imagerie rapide ont été effectuées sur l'écoulement. Il s'agit d'observer, d'un point de vue qualitatif, le comportement de la phase gazeuse et de la phase dispersée. Le post-traitement permet de réaliser des moyennes de phase et de superposer ces visualisations (*figure 15)*. Le signal de luminance est utilisé pour le conditionnement des mesures.

Pour cette nouvelle étude, la tranche laser a été générée par un laser pulsé à haute cadence Quantronix Darwin-527 (classe IV) de type Nd :YLF. La longueur d'onde du laser est de 527 nm. Une caméra rapide Phantom V341, équipée d'un objectif de focale 90 mm, est placée perpendiculairement à la nappe laser. Le système de synchronisation est réglé pour une acquisition de 500 images par seconde. La résolution de caméra est de 1024x768 px² pour une profondeur d'intensité lumineuse de 12 bit/pix. Comme pour la PIV, le champ de visualisation correspond au sillage de l'obstacle sur une longueur de 185 mm. Pour les essais en phase gazeuse, l'ensemencement de DEHS est réalisé au culot de l'obstacle via le canal d'injection. Les moyennes de phases ont été réalisées à partir de 110 images pour la phase gazeuse. La taille et la position des tourbillons visibles grâce au traceur sont en adéquation avec les résultats obtenus en PIV, (*figure 13-b)*.

Pour les essais en diphasique, le carburant liquide est injecté via l'injecteur « flat spray ». La carburation de la chambre de visualisation à froid (293 K) produisant un encrassement rapide des faces latérales a empêché l'enregistrement de longues séries d'images. En conséquence, les moyennes de phase n'ont été réalisées que sur des lots de 20 images pour la phase dispersée, ce qui est insuffisant. pour interpréter les résultats avec exactitude.

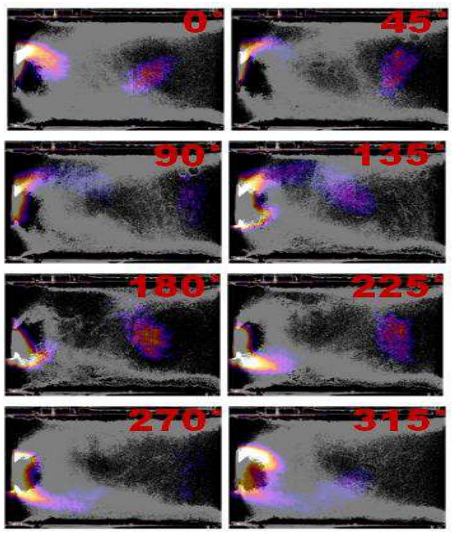


figure 15 : Phase gazeuse (couleur), phase dispersée (blanc)

Le seuillage sur l'intensité lumineuse des enregistrements de la phase dispersée fait ressortir différentes organisations quant à la distribution spatiale des gouttes. Les plus petites gouttes semblent être concentrées à l'intérieur des tourbillons. Les plus grosses sont, en général, projetées sur les parois supérieures et inférieures de la veine d'essais. Les gouttes de tailles moyennes semblent être ségrégées de façon préférentielle en périphérie des tourbillons comme le montre la *figure 15*. Pour confirmer ces résultats, des essais complémentaires telles que des visualisations directes et de l'Interférométrie Phase Doppler, à chaud (453 K) sont prévus.

Conclusion

Un nouveau moyen d'essais, le montage PROMÉTHÉE a été spécialement conçu pour l'étude des régimes de combustion. Une étude paramétrique a permis de retenir une géométrie d'accroche-flamme. La forme trapézoïdale avec un rapport de blocage de 42 % semble optimale pour obtenir un détachement tourbillonnaire régulier et intense. L'un des points importants de ce travail a consisté en la mise en place et la validation du conditionnement de mesures par rapport à un signal de référence pertinent. Un algorithme de traitement conditionnel a été développé puis appliqué sur des mesures. L'algorithme permet de réaliser des traitements statistiques de type « moyenne de phase ». Ces moyennes de phase ont permis de caractériser l'instationnarité de l'écoulement sur un cycle complet. En outre, elles ont montré qu'il était possible de synchroniser *a posteriori* différentes mesures. Ainsi, des visualisations de la phase gazeuse ont été superposées à des visualisations portant sur la phase dispersée. Des essais complémentaires, à chaud puis en combustion sont prévus dans la suite de ce travail en vue de montrer l'influence de la distribution spatiale de gouttes sur la structure des flammes.

Références :

[1] H.H. Chiu et al., Group combustion of liquid fuel sprays, AIAA (1983)

[2] N. Chigier, Group combustion models and laser diagnostic methods in sprays : a review, Combustion and flame (1983)

[3] R. Koch, Investigation of the effect of incomplete droplet evaporation prevaporization on NOx emissions in LDI combustion systems, ASME (2008)

[4] A. Strzelecki, Etude du détachement tourbillonnaire, Thèse

[5] Y. Le Sant, hathor.onera.fr/dtim/gpu-for-image/floigpu.php

[6] B. Lecordier, Principe de base de la PIV, cours AFVL

[7] L. Graftieaux et M. Michard., Combining PIV, POD and vortex identification algorithms for the study of unsteady turbulent swirling flows, Mes. Sci. Technol. 12 (2001)