

Etude de l'influence de la viscosité sur la distribution de taille de gouttes par mesure PDPA

Clément Brunet, Niccolo Gori, Gilles Godard, Félix Frindt, Gilles Cabot, Bruno Renou, Frederic Grisch

▶ **To cite this version:**

Clément Brunet, Niccolo Gori, Gilles Godard, Félix Frindt, Gilles Cabot, et al.. Etude de l'influence de la viscosité sur la distribution de taille de gouttes par mesure PDPA. 16ème Congrès Francophone de Techniques Laser pour la mécanique des fluides, CNRS, CentraleSupélec, Université Paris Saclay, IRSN, Sep 2018, Dourdan, France. hal-02098287

HAL Id: hal-02098287
https://hal.science/hal-02098287

Submitted on 12 Apr 2019

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.

Etude de l'influence de la viscosité sur la distribution de taille de gouttes par mesures PDPA et Ombroscopie

Clément BRUNET, Niccolo GORI, Gilles GODARD, Félix FRINDT, Gilles CABOT, Bruno RENOU, Frédéric GRISCH

CORIA-UMR-6614, Normandie Université, CNRS, INSA et Université de Rouen, Campus Universitaire du Madrillet - 76800 Saint Etienne du Rouvray France

Email auteur correspondant : clement.brunet@coria.fr

Le diagnostic de Phase Doppler Anemometry est une technique de mesure largement utilisée pour étudier les distributions en taille et en vitesse de gouttes dans un spray, mais celui-ci est rarement appliqué sur des fluides visqueux car très sensible à la non sphéricité desgouttes formées. La présente étude se propose d'étudier les performances de ce diagnostic sur un injecteur industriel de type simplex fonctionnant avec deux carburants, du kérosène et un mélange huile/kérosène permettant de simuler la viscosité du kérosène en haute altitude. Couplée à ces mesures, la technique d'ombroscopie ultra rapide a été utilisée pour analyser la structure du spray, donner une indication sur les conditions à étudier et post-traiter les mesures de PDA donc le procédé de validation des mesures n'était pas satisfaisant.

1 Introduction

L'industrie aéronautique est confrontée à de nombreuses contraintes, économiques et écologiques. Le développement de moteurs aéronautiques doit permettre une réduction de la consommation de carburant et des émissions polluantes. Parallèlement à ces objectifs, la sécurité d'un aéronef impose un réallumage en haute altitude systématiquement réussi. Les conditions en haute altitude imposant des températures et pressions faibles, celles-ci sont critiques pour l'allumage car elles augmentent la viscosité du carburant. Par suite, une dégradation de l'atomisation du jet liquide en fines gouttelettes se produit, ce qui entraine également une moins bonne évaporation du carburant dans la chambre de combustion.
L'objectif de la présente étude est de réaliser des mesures à pression atmosphérique sur un brouillard de gouttes issu d'un injecteur industriel aéronautique. Deux carburants sont utilisés : le premier est du kérosène standard (Jet A1) et le second est un mélange d'huile de turbine et de Jet A1 destiné à représenter un carburant de substitution du kérosène avec une viscosité équivalente à celle du kérosène refroidi à -50°C. Celui-ci sera dénommé Huile dans la suite de l'article.
L'étude de ces sprays nécessite des techniques d'analyse permettant la mesure de grandeurs physiques relatives aux gouttes. Les grandeurs scalaires recherchées sont leurs distributions de taille et de vitesse, les corrélations taille/vitesse ainsi que la concentration volumique des gouttes. Cependant, peu de techniques non-intrusives permettant de mesurer simultanément la taille et la vitesse de particules répondent à ce besoin. L'Anémométrie Phase Doppler (PDA) est parmi ces techniques l'une d'elles. Elle présente l'avantage d'obtenir un taux d'acquisition de mesures très élevé et ne nécessite généralement aucun étalonnage. Cependant, les mesures peuvent être entachées d'erreurs lorsque les gouttelettes produites dans le spray sont non-sphériques [1]. Une autre limitation concerne la mesure de la concentration locale en nombre et en volume des gouttelettes et la mesure de flux. La mesure de ces quantités peut s'avérer délicate en raison de la dépendance du volume de mesure à la taille des gouttes. De plus, il est souvent nécessaire de faire des hypothèses sur les gouttes rejetées. L'analyse d'images des gouttelettes par imagerie par ombroscopie (ou rétro-éclairage) est une alternative à la mesure PDA. Cette approche connaît un regain d'intérêt avec l'amélioration de la résolution et de la sensibilité des systèmes d'imagerie. Ce moyen de mesure est souvent préféré à l'éclairage direct pour la détermination des contours d'objets de formes irrégulières. Elle est de plus facile à mettre en œuvre en termes d'alignement optique et est peu sensible aux propriétés optiques des particules étudiés [2]. Néanmoins, les mesures de tailles de gouttes ont une précision de mesure dépendante de la distance entre la particule et le plan focal, du fait de la difficulté à déterminer précisément le contour d'un objet flou.
Dans cette étude, les techniques de PDA et d'imagerie par rétro-éclairage ont été utilisées pour étudier le comportement des deux carburants lors de leur injection dans un environnement à pression atmosphérique. Des images des brouillards de gouttes sont acquises dans un premier temps avec le système

d'imagerie haute-cadence de rétro- éclairage (99 000 ips). L'acquisition d'images à haute cadence permet d'étudier la structure du brouillard de gouttes lors de l'injection des deux carburants, l'injection se faisant pour différentes pressions d'injection. Des mesures par PDA sont ensuite réalisées sur les deux brouillards de gouttes de manière à quantifier les distributions de taille de gouttes et les profils de vitesse. Les limites d'utilisation de la méthode du traitement des mesures PDA ont été analysées, notamment lorsque l'huile est utilisée comme carburant. Cette analyse est réalisée avec l'utilisation des images d'ombroscopie qui nous permettent, selon les conditions opératoires étudiées de réduire les possibles biais de mesures observés lors de l'analyse des mesures PDA par le traitement habituel des données conventionnellement utilisées pour des brouillards de gouttes bien sphériques.

2 Dispositif expérimental

La campagne de mesure a été conduite avec un injecteur industriel simplex sans écoulement d'air forcé, à pression atmosphérique et température ambiante (20°C).
Pour évaluer l'impact de la viscosité sur les mécanismes d'atomisation, deux carburants ont été utilisés : du kérosène commercial Jet-A1 (ρ_{kero} = 743 kg.m^{-3}, ν_{kero} = 2,21x10^{-6} m^2.s^{-1}), et un mélange de 17%vol de Jet-A1 dans 83%vol d'huile référencé comme Aeroshell Turbine Oil 3 (ρ_{huile} = 852 kg.m^{-3}, ν_{huile} = 8,84x10-6 m^2.s^{-1}). Ce mélange est traditionnellement utilisé par les motoristes aéronautiques pour simuler les propriétés du kérosène lorsque celui-ci est utilisé dans lors d'une phase de réallumage du moteur à haute altitude.
Le débit de carburant injecté est contrôlé par un débitmètre Coriolis (Bronkhorst mini CORI- FLOW M14) ayant une précision sur le débit massique de liquide de $\pm$ 0,2%. La pression d'injection du carburant est mesurée avec un capteur de pression Keller 33 X d'une précision de 0,1%.
Les mesures par rétro-éclairage sont réalisées avec une caméra Phantom V2512 utilisant un capteur CMOS 12 bits, la taille des pixels est de 28 µm, et l'acquisition des images est fixée à 99 000 fps avec un temps d'exposition de 4 µs, sur un champ de 512$\times$384 pixels. Une lampe à arc au xénon, d'une puissance de 100 W (Newport Low Power Q series) a été utilisée comme source de lumière.
Les mesures par PDA ont été réalisées avec un système de mesure PDA commercial (Dantec Dynamics P800) et avec des sondes Dantec DualPDA. La source laser est un laser continu à Argon Coherent Innova 300, émettant une puissance de 0,6 W. Le faisceau en sortie de laser est séparé en deux avec une lame de diviseur de faisceau Colorburst Multicolor Beam Separator 9201, fournissant ainsi deux faisceaux lasers à 512 et 488 nm respectivement. Ces faisceaux sont ensuite séparés en deux pour traverser chacun une cellule de Bragg (Dantec Dynamics) cadencée à la fréquence de 40 MHz.
Les faisceaux polarisés horizontalement sont ensuite focalisés dans le brouillard de gouttes par la sonde émettrice pour former un réseau de franges. La sonde réceptrice des signaux de mesures collecte les signaux Doppler émis par les particules traversant le réseau de franges avec trois photomultiplicateurs alignés verticalement et placée à 68,5° de l'angle d'émission de sorte à reécupérer un signal issu de la réfraction du deuxième ordre. Le signal mesuré est converti par le processeur du PDA, puis analysé avec le programme d'analyse *BSA Flow Software*.
Le système d'injection de carburant est installé sur un système de déplacement 3D ayant une précision de 0,1 mm. Ce système permet de laisser immobile le dispositif optique afin d'éviter tout dérèglement des optiques pendant les mesures. La précision des mesures par PDA est estimée à 1% D_{max} + 1% $D_{mesuré}$ avec une répétabilité de 0,5%, pour les vitesses la précision est de 0,5% et la répétabilité de 0,05% [1]. La distribution de gouttes couvrant un grand domaine de tailles, un échantillonnage de mesures sur 10 000 gouttes est réalisé en chaque position spatiale dans le but d'assurer une convergence des diamètres moyens.

3 Structure et développement du spray

La Figure 1 présente la comparaison de l'évolution du spray pour des pressions d'injection allant de 1,76 bar à 17,6 bar, à gauche pour du kérosène (débits couvrant le domaine 0,64 g.s^{-1} – 1,61 g.s^{-1}) et à droite pour le mélange huile/kérosène (débits couvrant le domaine 0,62 g.s^{-1} – 2,00 g.s^{-1}). Le spray de kérosène à P=1,96 bar et représenté en Fig.1(a) produit, dès les basses pressions, un nappe fine de carburant liquide se développant en forme de tulipe. Ce film est ensuite déstabilisé par la présence d'instabilités de Kelvin-Helmholtz [2] ce qui conduit à une désintégration en ligaments à z $\approx$ 3D_0 de

la buse. Ceux-ci vont se désintégrer ensuite par l'intermédiaire d'instabilités de Rayleigh [2] dans la zone située entre z $\approx 3D_0$ et $8D_0$. La forme en tulipe du film liquide entraine une concentration de ces ligaments autour de l'axe d'injection, augmentant ainsi des interactions mutuelles et rendant variable la longueur de la zone de désintégration des ligaments, en fonction du degré de resserrement du film sur lui-même.
Une augmentation de la pression d'injection à 3,8 bar (Fig.1(c)) continue d'assurer une forme conique au film liquide. Celui-ci garde une longueur d'environ $3D_0$, mais les ligaments ne sont plus créés sur l'axe d'injection et la désintégration de ceux-ci apparait plus rapidement (entre $3D_0$ à $5D_0$). A 7,56 bar, Fig.1(e), la longueur du film est ramenée de $3D_0$ à $2D_0$, la zone de désintégration de ligaments diminue à $1{,}5D_0$ avec l'augmentation de la vitesse d'éjection. L'angle d'ouverture du brouillard de gouttes passe de 40° pour P=3,8 bar à 45° pour 7,56 bar.
Finalement, pour une pression de 17,6 bar, la vitesse d'éjection du liquide devient suffisamment importante pour modifier significativement la structure du spray: le film conique n'est alors plus homogène, et des jets partant des canaux d'injections du simplex apparaissent, créant ainsi deux modes d'atomisation simultanés. Le film liquide se développant entre les jets est très rapidement désintégré en ligaments (typiquement à une distance de la buse inférieure à D_0), eux-mêmes atomisés jusqu'à z $\approx 2D_0$ de la sortie du système d'injection. Dans le même temps, les jets se désintègrent suite aux instabilités de Rayleigh à partir de z $\approx 2D_0$ pour créer des sillages visibles diminuant ainsi l'homogénéité du spray.
La structure du spray du mélange huile/kérosène observée expérimentalement est très différente, notamment lorsque la pression d'injection est faible. A 1,96 bar (Fig.1(b)), seuls deux jets sont visibles, la viscosité élevée du carburant empêchant une interaction normale des canaux dans le simplex. Ces deux jets sont ensuite déstabilisés par des instabilités de Rayleigh. De grosses gouttes massives partiellement agglomérées deviennent visibles. A 3,8 bars (Fig.1(d)), une structure chaotique se développe et crée alternativement des ligaments et un film discontinu sur une longueur de $3D_0$. Des ligaments sont observés jusqu'à z = $15D_0$, position maximale du champ d'observation. A P=7,56 bar, une nappe en forme de tulipe comparable à celle observée à 1,96 bar avec du kérosène est visible. Cette nappe est sujette à des instabilités de Kelvin-Helmholtz de plus forte amplitude et de plus basse fréquence que celles affectant le kérosène. Ceci est visible sur la Fig.1(f) où le film oscille entre une forme conique de très faible ouverture (20°) et une forme en tulipe se refermant suffisamment pour casser la nappe en deux. Les ligaments sont présents jusqu'à une distance de $10D_0$ de la buse selon la forme du film, la forme en tulipe générant des agglomérations de liquide selon l'axe d'injection et par voie de conséquence des ligaments plus massifs.
Le passage de la structure chaotique de P=3,8 bar à une structure avec film se fait à environ 4,8 bar par une transition très rapide (de l'ordre de 50 ms). Enfin, à P = 17,6 bar, la nappe présente une forme conique de $2D_0$ de longueur. La zone de désintégration des ligaments couvre la zone entre $2D_0$ et $8D_0$. L'ouverture du spray est nettement plus faible qu'à la même pression d'injection de kérosène (angle de 47° au lieu de 56° respectivement, mesuré à partir d'une moyenne sur 200 images instantanées). Il en résulte une dégradation de l'atomisation du jet par rapport à celle d'un jet de kérosène à même pression d'injection, ce qui se traduit par un nombre important de formation d'agglomérations de grosses gouttes et de ligaments sur les images.

4 Mesures PDA

La technique de Phase Doppler Anemometry est basée sur l'utilisation d'un réseau de franges optiques créé par le croisement de deux faisceaux lasers de même longueur d'onde [3, 4, 5]. Les gouttes traversant le réseau de franges émettent un signal Doppler. En mesurant le signal de mesure produit par la goutte avec deux détecteurs séparés spatialement, un déphasage entre les signaux détectés par chaque détecteur peut être mesuré, celui-ci dépendant de la vitesse de la goutte, de son indice de réfraction et de son diamètre. La vitesse de la goutte étant déduite de la fréquence du signal mesuré et de la distance interfranges, et moyennant une connaissance des paramètres géométriques du montage optique, une corrélation entre la phase et le diamètre des gouttes est alors déduite. Cependant, la mesure du déphasage est connue à une incertitude de 2π. Pour lever cette contrainte, un troisième détecteur est placé de sorte à mesurer deux déphasages indépendants sur les signaux produits par la même goutte [6]. L'un des signaux fournira une estimation de D_{goutte} sur une gamme étendue de diamètres, ce qui permettra de lever l'incertitude de 2π sur l'autre mesure qui donnera une valeur précise de D_{goutte}. Deux hypothèses ont été utilisées dans cette approche d'analyse: la goutte est sphérique et une seule goutte

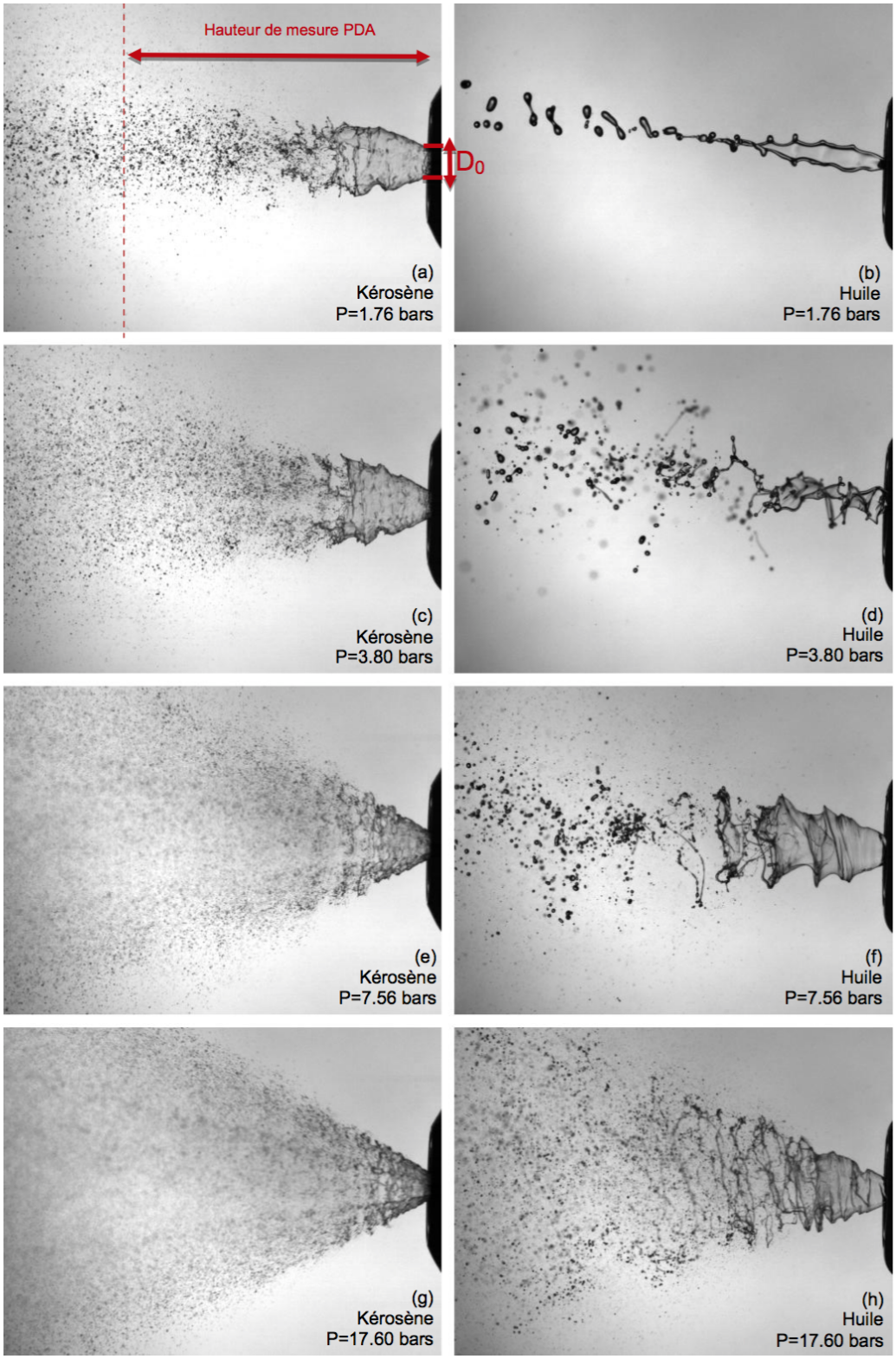


Figure 1: Ombroscopie des sprays au kérosène et à l'huile selon la pression d'injection.

traverse le réseau de frange à chaque fois.
Ce fonctionnement du PDA donne donc deux mesures de déphasage relatives à la même goutte, et donc, au même diamètre. Un des moyens d'analyser la précision de la mesure est le diagramme de phase, permettant de visualiser, pour chaque goutte mesurée, le déphasage mesuré par chacun des détecteurs. La relation existante entre la phase et le diamètre étant linéaire et en supposant un spray idéal, les mesures devraient s'aligner le long d'une droite. Cependant, les incertitudes de mesure donnent une répartition des mesures de taille dans un nuage de points située autour de la droite que l'on pourra traduire comme un intervalle de validation. Des mesures de déphasage d'une même goutte peuvent alors être validées dans le traitement des données même si elles ne respectent pas strictement la relation phase/diamètre. Cela suppose que l'erreur de mesure sur la taille de goutte est relative à un biais de mesure, et non à une non-sphéricité ou unicité de la goutte dans le volume de mesure. Le diagramme de phase ainsi défini peut nous renseigner sur le facteur de qualité de la mesure mais celui- ci ne permet pas d'obtenir une taille de goutte absolue.

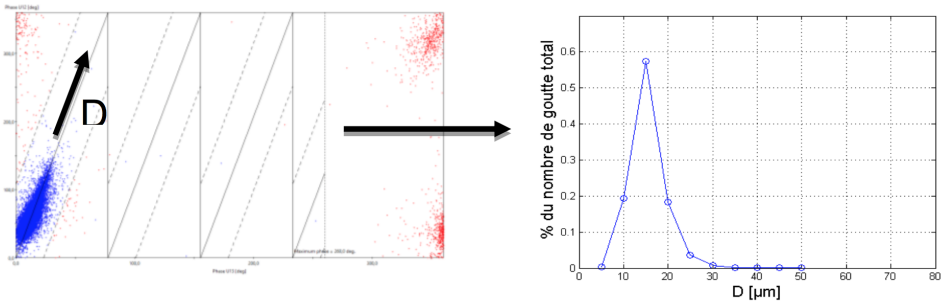


Figure 2: Diagramme de phase et distribution en nombre de gouttes.

5 Mesure PDA sur un spray de kérosène

Les mesures réalisées sur un spray de kérosène ont été réalisées à une distance de 30 mm de la sortie de l'injecteur. Une analyse radiale avec un pas de 1 mm est alors effectuée. Les positions extrêmes des mesures de taille correspondent au cas où le taux de comptage de gouttes est inférieur à 250 gouttes/s. Trois pressions d'injection ont été sélectionnées pour être représentatives de conditions d'allumage d'un mélange kérosène/air.

Les diamètres de Sauter D_{32} sont calculés par l'expression suivante :

$$D_{32} = \frac{\sum_{j=1}^{nbgouttes} D_j^3}{\sum_{j=1}^{nbgouttes} D_j^2} \quad (1)$$

Les profils de D_{32} dans le spray de kérosène montrent un diamètre de gouttes minimal au centre du spray (Fig 3a) et maximal à son bord, résultat confirmant les résultats par ombroscopie. Une diminution des diamètres de gouttes est observée avec l'augmentation de la pression. Une dissymétrie du profil radial des diamètres de Sauter est visible à P = 17,6 bar, celui-ci étant vraisemblablement due à un rapprochement du volume de mesure PDA sur un des jets soumis à une instabilité de Rayleigh, comme cela avait été souligné sur les images d'ombroscopie. Les profils de vitesse (Fig 3b) suivent une forme en W avec des vitesses maximales aux bords du spray et au centre du spray.

6 Mesure PDA sur sur un spray d'Huile de synthèse

Comme pour les mesures PDA sur le spray de kérosène, les mesures radiales sur le spray d'huile de synthèse ont été réalisées à 30 mm à la sortie de l'injecteur, par pas de 1 mm. Chaque mesure est validée sur un nombre minimal de 10 000 gouttes. Les mesures à P = 17,6 bar sont comparables au cas de procédé d'atomisation visible en Fig.1(h). L'effet de la forme en tulipe du film est visible sur les profils

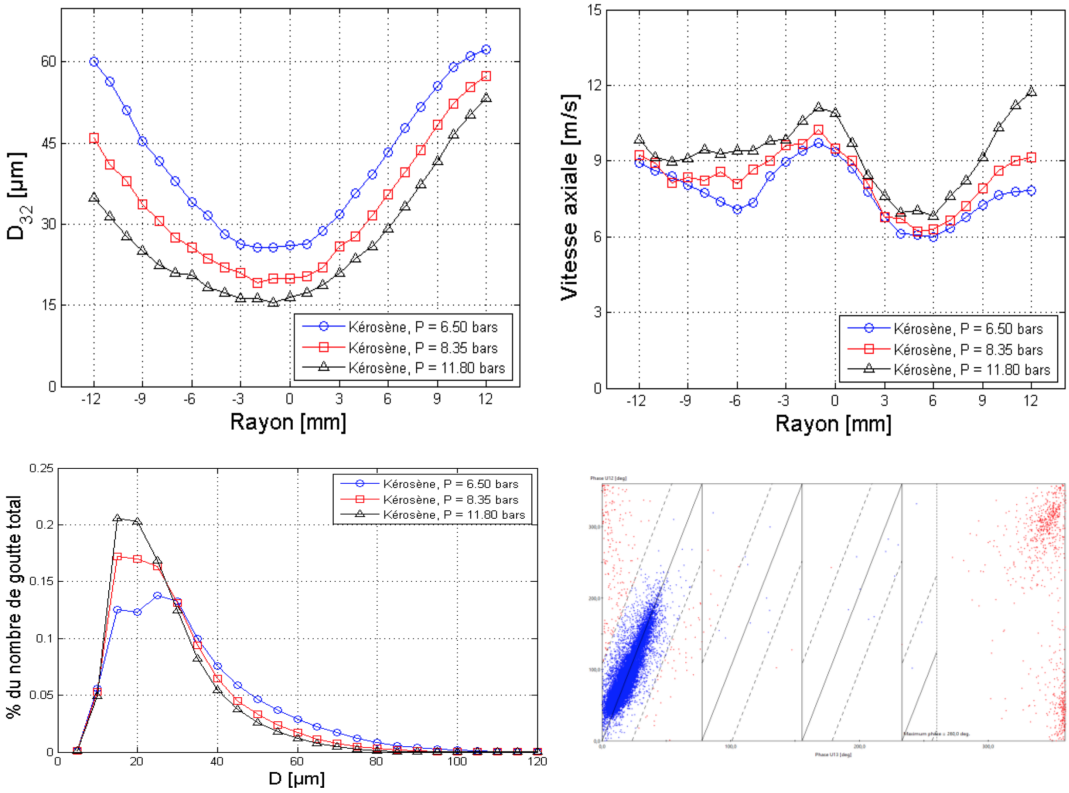


Figure 3: Spray de kérosène.

du diamètre de Sauter D_{32} (Fig 4a). Une forme de cloche inversée est obtenue avec un spray de kérosène alors que celui-ci est plat avec le carburant de substitution. Cet effet provient de l'instabilité du film liquide à cette pression d'injection. De plus, la non-sphéricité des gouttes produites dans le spray d'huile de synthèse représente un facteur clé jouant sur la précision des mesures de taille comme souligné sur le diagramme de phase présenté en Fig 4b. Un nuage homogène de mesures de taille est présent dans tout le domaine excédent 130 µm.Comme explicité dans la section 3.1, il devient impossible de préciser si les mesures de taille validées par le traitement d'analyse représentent des artéfacts de mesures provenant d'agglomérations de gouttes ou de ligaments, ou des mesures réelles de gouttes. L'importante incertitude sur la valeur du D_{32} rend alors les mesures difficilement exploitables. En supposant que le nuage de mesures de taille observé sur le diagramme de phase s'étale de manière symétrique autour de la droite de validation, une valeur limite probable du diamètre des gouttes peut être définie. Les valeurs supérieures de ce au limites de ce nuage sont alors prises comme des artéfacts de mesure. Ce traitement des mesures implique cependant de supprimer d'éventuelles grosses gouttes réelles ce qui entrainera une diminution du pourcentage de débit mesuré, lui-même impacté par le rejet des ligaments et d'agglomérations de gouttes.

7 Conclusion

Des mesures par imagerie ultra-rapide par rétro-éclairage ont été réalisée sur un injecteur industriel à pression atmosphérique. Deux carburants de viscosité différentes, représentatifs de ceux rencontrés en conditions réelles ont été étudiés. Les résultats ont permis d'illustrer les mécanismes d'atomisations lors de la production du spray. Dans un seconde étape, des mesures de tailles de gouttes par PDA on été effectuées. Les mesures sur le spray de kérosène ont permis d'étudier la distributions en tailles et les profils de vitesse avec précision. Les mesures réalisées sur le carburant de substitution (huile/kérosène)

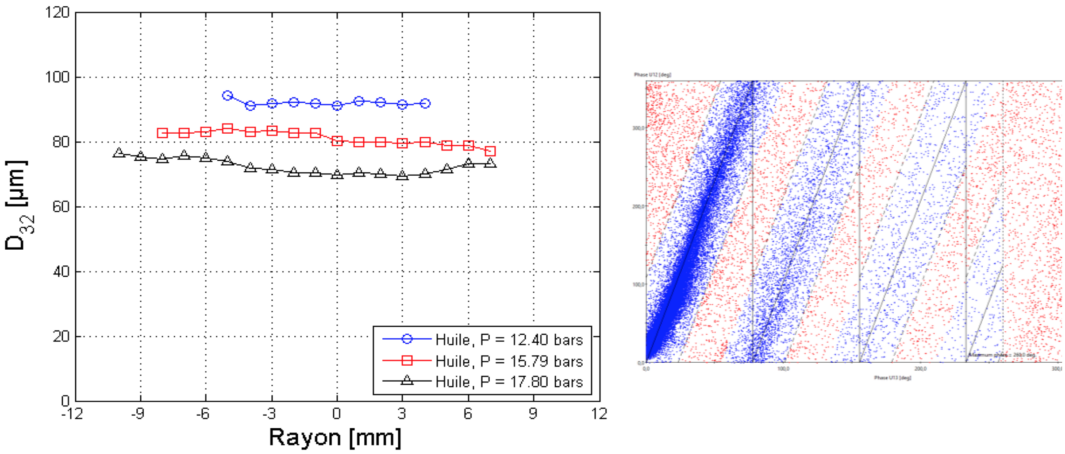


Figure 4: Diamètres moyens des sprays à l'huile et diagramme de phase.

ont été fortement perturbées par l'existence de non-sphéricité des gouttes, ce qui permt de préciser les limites de ce diagnotic de mesure. Une estimation des diamètres moyens a tout de même été entreprise en couplant les mesures PDA avec celles réalisées par imagerie rapide. Les résultats dans le spray de kérosène à température ambiante montre que ceux-ci sont exploitables. En revanche, une analyse PDA d'un spray avec des carburants visqueux va provoquer des biais de mesures signifiatifs. Un couplage avec des mesures par ombroscopie permet de lever un certain nombre de biais et d'entrevoir une possible exploitation des tailles de gouttes mesurés par PDA.

References

[1] W. Lai, J. Shakai, D. Troolin, Accuracy, Resolution and Repeatability of Powersight PDPA and LDV systems. TSI Technical Note P(5001520)

[2] C.T. Crowe, U. Fritsching, Multiphase Flow Handbook, Taylor & Francis, 2005.

[3] F. Durst, M. Zare, Laser Doppler Measurements in Two-Phase Flows, Proceedings of LDA Symposium, Skovlunde, Copenhagen, 1975

[4] W.D. Bachalo , M.J. Houser, « Phase/Doppler Spray Analyser for Simultaneous Measurements of Drop Size and Velocity Distributions, Optical Engeenering, 23 p.583-590, 1984

[5] K. Bauckhage, « The Phase Doppler Difference Method, a New Laser Doppler Technique for Simultaneous Size and Velocity Measurements », Particle & Particle Systems Characterization, 5 : p. 66-71, 1988

[6] F. Onofri, T. Girasole, G. Gréhan, G. Gouesbet, G. Brenn, J. Domnick, T.H. Xu, C. Tropea, « Phase-Doppler Anemometry with the Dual Burst Technique for Measurement of Refractive Index and Absorption Coefficient Simultaneously with Size and Velocity», Particle & Particle Systems Characterization, 13 : p. 112-124, 1996