CARACTÉRISATION D'INJECTEURS AÉRONAUTIQUES PAR DIFFRACTION LASER ET MESURES LIDAR

C. Ledent*[1], B. Déjean[1], C. Laurent[1], O. Rouzaud[1] et R. Ceolato[1]

[1]ONERA, The French Aerospace Lab, Université de Toulouse, FR 31055 Toulouse, France
*Courriel de l'orateur : chloe.ledent@onera.fr

TITLE

Characterization of aeronautical atomizers by laser diffraction and LiDAR measurements

RESUME

L'injection et l'atomisation de carburant liquide dans les foyers de combustion automobile ou aéronautique sont des phénomènes clés pouvant influencer le bon fonctionnement du moteur. De ce fait, leur caractérisation expérimentale est importante pour valider le choix du système d'injection ou le design du foyer de combustion. De nombreux diagnostics optiques ont déjà permis d'accéder aux distributions de taille, vitesses et concentrations des gouttes. On se propose ici d'utiliser le LiDAR Colibri, basé sur la rétrodiffusion, pour caractériser deux injecteurs : l'un de type pressurisé et l'autre de type airblast. Une comparaison des résultats avec des mesures de type diffraction laser est également proposée.

ABSTRACT

Fuel injection and atomization in automotive or aerospace combustion chambers are key phenomena that can influence engine performance. Therefore, their experimental characterization is important for validating the choice of injection system and the combustion chamber design. Numerous optical techniques have already provided access to droplet size distribution, velocity and concentration. We propose here to use the LiDAR Colibri, based on backscattering, to characterize two pressurized and airblast atomizers. A comparison of the results with laser diffraction measurements is also proposed.

MOTS-CLES : granulométrie, injecteur, diffraction laser, LiDAR / **KEYWORDS:** PSD, atomizer, laser diffraction, LiDAR

1. INTRODUCTION

L'atomisation d'un liquide en un brouillard de fines gouttelettes est un processus de grande importance dans divers secteurs industriels tels que l'agriculture, l'aéronautique et même la médecine. Il existe pour cela une grande variété de systèmes d'injection selon l'application souhaitée et le spray créé est généralement caractérisé par un large spectre de tailles de gouttes (polydispersion).

Dans le secteur aéronautique, connaître les propriétés des injecteurs est essentiel pour optimiser leur rendement, notamment en contrôlant la taille des gouttes. Cela permet d'améliorer la combustion, de limiter la formation d'espèces polluantes mais aussi de réduire la consommation de carburant. Les travaux présentés, ici, proposent de caractériser expérimentalement la distribution de taille et la concentration des gouttes issues de l'atomisation de mélanges simples par des injecteurs pressurisés et de type airblast, en utilisant le LiDAR Colibri (*Light Detection and Ranging*) basé sur la rétrodiffusion et développé à l'ONERA ainsi qu'un granulomètre à diffraction laser (Malvern Spraytec ®). De nombreuses autres techniques de mesure optique existent pour caractériser les brouillards de gouttes, les plus communes étant le PDA (*Phase Doppler Anemometry*), l'ombroscopie ou encore le PDS (*Planar Droplet Sizing*). Bien que ces techniques soient largement développées et utilisées depuis plusieurs décennies, il est intéressant de proposer une caractérisation de spray via le système LiDAR Colibri car il s'agit d'un nouvel outil dont l'aspect innovant de la mesure réside dans l'application sur des particules liquides qui absorbent peu. Ces mesures complémentaires de diffraction et de rétrodiffusion permettent une comparaison des résultats de ces systèmes de mesure optique. Des mesures simultanées ont donc été réalisées puisque les outils disposent de filtres suffisamment précis pour que les lasers n'interfèrent pas et il est, par exemple, possible de déterminer le facteur de transmission du brouillard de gouttes par chacun des systèmes. Or, ce facteur est une propriété importante à connaître puisqu'il est directement lié à l'extinction des faisceaux par les gouttes.

2. MÉTHODES

2.1. Injecteurs aéronautiques

Les systèmes d'injection permettant de créer un écoulement à phase dispersée par le principe de l'atomisation sont nombreux. C'est pourquoi Lefebvre (1989) propose de les classer en fonction des mécanismes physiques de pulvérisation :

DOI : 10.25576/ASFERA-CFA2024-38899 Cet article est publié sous la seule responsabilité de ses auteurs

- injecteur pressurisé,
- injecteur rotatif,
- injecteur assistés par air/de type airblast,
- injecteur électrostatique ou encore ultrasonique.

Les injecteurs pressurisés et airblast sont les plus communs dans les domaines automobile et aéronautique. Ce sont ceux que nous avons choisi de caractériser. Les injecteurs pressurisés ont un design relativement simple avec une arrivée d'air et de liquide commune. Le mélange mis sous pression est injecté et la différence de vitesses avec le milieu environnant permet de réaliser le processus d'atomisation. De petits orifices de sortie permettent une atomisation fine mais, en pratique, il est difficile de maintenir le mélange exempt de particules étrangères. Cela implique que la taille minimale de l'orifice de sortie de ces injecteurs est limitée à 0,3 mm afin d'éviter son obstruction. Les injecteurs pressurisés ont été très largement étudiés pour déterminer les effets de la vitesse d'injection du mélange sur la taille des gouttes produites, par exemple (Bayvel, 1993). Contrairement aux injecteurs pressurisés, les injecteurs assistés par air ou de type airblast atteignent des vitesses relatives élevées en injectant le liquide à une faible vitesse dans un écoulement d'air à grande vitesse (Déjean, 2015), (Doublet, 2019). Les arrivées d'air et de liquide sont donc séparées ce qui permet d'éviter des ratios carburant/air élevés qui sont à l'origine de la production de fumées d'échappement. L'influence des propriétés du mélange atomisé et des paramètres d'injection sur la taille des gouttes est connue mais la concentration de ces dernières a été peu investiguées.

Caractériser la taille et la concentration des gouttes produites est primordial puisque la performance des foyers de combustion en dépend fortement. Dans le cadre de ces travaux, les sprays générés par les deux injecteurs étudiés sont des sprays à cône plein dont l'angle est compris entre 10 et 40°.

2.2. Techniques de mesures optiques

Le granulomètre à diffraction laser est un outil de mesure qui permet de déterminer la taille des particules grâce à la diffraction de la lumière, selon les théories de Mie et de Fraunhofer. Ce système, commercialisé sous le nom Malvern Spraytec®, mesure la variation angulaire de l'intensité de la lumière diffusée en traversant le spray. Cette mesure est de type intégral puisqu'elle se fait sur une ligne de visée. La longueur d'onde du faisceau est de 632,8 nm. Les particules mesurées sont supposées parfaitement sphériques et leurs tailles doivent être comprises entre 0,1 et 900 µm. C'est un système très largement utilisé pour obtenir des distributions de taille de gouttes pour des injecteurs ou des sprays plus classiques comme ceux du domaine pharmaceutique par exemple (Dayal, 2004).

Le second outil est le LiDAR Colibri, un système optique permettant de mesurer de nombreux paramètres tels que la taille ou la composition chimique de particules en s'appuyant sur le phénomène de rétrodiffusion de la lumière. La source et le récepteur se situent dans un seul boîtier car le LiDAR émet un faisceau lumineux et analyse sa rétrodiffusion après que celui-ci ait rencontré un obstacle : un brouillard de gouttes, dans notre cas. Ses applications sont variées mais on retrouve, entre autres, l'étude des particules atmosphériques émises naturellement ou par des activités anthropiques (Paulien, 2020). De plus, contrairement au Malvern Spraytec®, il a la capacité de mesurer les caractéristiques de gouttes dont la taille est de l'ordre du nanomètre et il peut également identifier la géométrie des particules, et donc vérifier leur sphéricité. La longueur d'onde du faisceau est de 532 nm. La mesure LiDAR est caractérisée par trois coefficients principaux :

- le coefficient d'extinction α, qui caractérise l'absorption et la diffusion de la lumière par les particules,
- le coefficient de rétrodiffusion β, qui caractérise la capacité des particules à renvoyer une partie de l'onde lumineuse incidente,
- le *lidar ratio* LR, qui se définit comme le rapport de α sur β,

$$\alpha(r) = \int_{R_{min}}^{R_{max}} N_p(r,R)\sigma_{ext}(r,R)dR,$$

$$\beta(r) = \int_{R_{min}}^{R_{max}} N_p(r,R)\sigma_{back}(r,R)dR,$$

$$LR(r) = \frac{\alpha(r)}{\beta(r)},$$

où R_{min} et R_{max} sont, respectivement, les rayons minimaux et maximaux de la distribution en taille des gouttes, N_p la concentration de particules dans le brouillard de gouttes étudié et σ_{ext} et σ_{back} les sections efficaces, respectivement, d'extinction et de rétrodiffusion.

DOI : 10.25576/ASFERA-CFA2024-38899 Cet article est publié sous la seule responsabilité de ses auteurs

Dix-huit essais ont été menés avec une utilisation simultanée du granulomètre à diffraction laser (Malvern Spraytec®) et du LiDAR Colibri. L'acquisition a été faite sur une durée de 30 secondes. Les essais ont été réalisés dans des conditions ambiantes mesurées par un appareil HygroPalm HP21 (température moyenne de l'air de 20°C et 40% d'humidité relative moyenne) et à pression atmosphérique. Dans un premier temps, les injecteurs étaient en position verticale, c'est-à-dire qu'ils injectaient le liquide vers le sol de la pièce. Les deux faisceaux se croisaient avec un angle de 90° et étaient localisés à 16 cm de l'orifice de sortie des injecteurs. Le boîtier du LiDAR se situait à 10 m du spray. Un panneau noir était positionné à 14 m de ce boîtier. La configuration est donnée sur la figure 1.

Les mélanges atomisés étaient de composition simple afin de caractériser les injecteurs dans les conditions les plus standards : eau distillée, eau distillée avec une fraction massique de sel de 20% et eau distillée avec une fraction massique de glycérol de 20%. L'ajout de sel et de glycérol a pour objectif d'analyser l'effet de la salinité et de la viscosité sur la taille des gouttes générées.

Figure 1. Banc de caractérisation des injecteurs par granulomètre à diffraction laser et LiDAR Colibri

3. RÉSULTATS ET PREMIÈRES DISCUSSIONS

Le tableau 1 récapitule les paramètres principaux de quelques essais : les diamètres moyens D_{10} et D_{32} ainsi que le facteur de transmission T, tous mesurés par le granulomètre à diffraction laser.

Tableau 1. Paramètres et résultats préliminaires des essais pour de l'eau distillée

Essai	Injecteur	Pression d'injection (bar)	Pression liquide (bar)	Pression air (bar)	D_{10} (µm)	D_{32} (µm)	T (%)	Écart type de T (%)
1	Pressurisé	0,69	-	-	113,47	309,23	98,07	0,39
2	Pressurisé	2,07	-	-	94,36	171,64	96,64	0,34
3	Pressurisé	3,45	-	-	21,27	92,06	82,74	1,73
4	Pressurisé	4,83	-	-	58,62	83,08	72,85	1,29
5	Airblast	-	0,69	1,38	104,33	465,94	96,37	0,36
6	Airblast	-	0,69	3,45	2,27	12,37	87,87	0,26
7	Airblast	-	2,76	1,38	220,86	528,34	94,61	0,46
8	Airblast	-	2,76	3,45	2,32	33,35	75,65	1,45

En traversant le spray, le faisceau du Malvern Spraytec® est diffracté. Les grosses gouttes (plusieurs centaines de microns) diffusent la lumière à de petits angles par rapport au faisceau et les petites gouttes diffusent à de plus grands angles. Ainsi, les récepteurs, qui sont disposés de manière concentrique, mesurent l'intensité lumineuse en fonction de l'angle et la distribution de taille des gouttes est déterminée par la théorie de Mie. La distribution est, par exemple, représentée par une distribution log-normale.

De plus, afin de déterminer la concentration en gouttes du spray, il est nécessaire de déterminer, dans un premier temps, des paramètres tels que le facteur de transmission T et le coefficient d'extinction α. Le facteur de transmission T correspond au rapport de l'intensité lumineuse I du faisceau à la distance b dans le spray sur l'intensité lumineuse I_0 du faisceau avant de pénétrer dans le spray. Il est calculé directement par le Malvern Spraytec® avec la loi de Beer-Lambert, et on en déduit ainsi le coefficient d'extinction moyen $\overline{\alpha}$ du spray :

DOI : 10.25576/ASFERA-CFA2024-38899 Cet article est publié sous la seule responsabilité de ses auteurs

$$T = \frac{I}{I_0} = \exp[-\overline{\alpha}\, b],$$

$$\overline{\alpha} = -\frac{1}{b}\ln(T).$$

En l'absence de spray, le facteur de transmission est de 100%. Pour tous les essais, les mesures ont montré que lorsque la pression d'injection augmente, le facteur de transmission diminue. Par exemple, pour les essais 1 et 4, les facteurs de transmission mesurés par le Malvern Spraytec® sont de 98,07% et 72,85% avec des écarts types de 0,39% et 1,29%, respectivement. Cette tendance s'observe également pour un injecteur assisté par air. Les essais 7 et 8 ont, respectivement, un facteur de transmission mesuré de 94,61% et 75,65% avec un écart type respectif de 0,46% et 1,45%. L'augmentation de la pression d'injection (ou de la pression de l'air pour un injecteur assisté par air) conduit à une diminution de la taille des gouttes et donc à une augmentation de la concentration de gouttes dans le spray. De cette façon, cela contribue à diminuer l'intensité du faisceau.

On considère maintenant les données mesurées par le LiDAR Colibri. Le système enregistre un signal de rétrodiffusion atténué, noté U, sur lequel apparaissent deux pics. Le premier pic correspond à la rétrodiffusion d'une partie du faisceau par les gouttes et reçue par le boîtier LiDAR. La partie non rétrodiffusée du faisceau traverse le spray et se retrouve plus ou moins atténuée selon la concentration de gouttes, son extinction correspond au second pic du signal. Ainsi, on peut retrouver le facteur de transmission car il est proportionnel au signal U et aux coefficients α et β (Ceolato, 2020), (Ceolato, 2021) :

$$U(r) = \beta(r)\exp\left[-2\int_0^r \alpha(r')dr'\right],$$

$$T(r) = \frac{U(r)}{\beta(r)},$$

$$T(r) = \exp\left[-2\int_0^r \alpha(r')dr'\right].$$

Le LiDAR Colibri introduit la notion de facteur de transmission bidirectionnel, d'où l'apparition d'un coefficient 2 dans son expression (Measures, 1992). Les coefficients α et β nécessaires au calcul du facteur de transmission sont modélisés par la distribution en taille des gouttes obtenue par le granulomètre à diffraction laser ainsi que par la théorie de Mie. Pour autant, cela ne signifie pas que le coefficient d'extinction modélisé sera identique à celui calculé à partir du facteur de transmission du Malvern Spraytec®. En effet, chaque outil possède ses propres méthodes et les définitions peuvent donc varier. Le fait que le LiDAR Colibri possède sa source et son récepteur dans le même boîtier, contrairement au Malvern Spraytec®, montre qu'il existe une différence notable dans la définition de T. Les analyses en cours permettront de lier les deux paramètres pour réaliser une comparaison des deux appareils de mesure.

D'autres essais sont également prévus pour confirmer la répétabilité des mesures. Enfin, les calculs seront développés pour déterminer la concentration de gouttes du brouillard dans le volume de mesure de chaque technique de mesure optique.

Lefebvre, A. H. (1989) Atomization and Sprays, Hemisphere Publishing Corporation.

Bayvel, L. and Orzechowski, Z. (1993) Liquid Atomization, CRC Press.

Doublet, P. (2019) Effet de la pression et de la température de l'air et du carburant sur les caractéristiques du spray délivré dans une chambre de combustion, PhD thesis, Université de Toulouse, Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace.

Déjean, B. (2015) Etude expérimentale de l'atomisation d'une nappe liquide avec et sans zone de pré-film en vue de sa modélisation – Influence des conditions limites, PhD thesis, Université de Toulouse, Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace.

Dayal, P., Shaik, M. S. and Singh, M. (2004) J. Pharm. Sci. 93, 1725-1742.

Paulien, L., Ceolato, R., Soucasse, L., Enguehard, F. and Soufiani, A. (2020) J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 241, 106706

Ceolato, R., Bedoya-Velasquez, A. and Mouysset, V. (2020) Remote Sens. 12, 3286.

Ceolato, R. and Berg, M. J. (2021) J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 262, 107492.

Measures, R. M. (1992) Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications, Krieger Publishing Company.

DOI : 10.25576/ASFERA-CFA2024-38899 Cet article est publié sous la seule responsabilité de ses auteurs