
Granulométrie par imagerie d'un écoulement diphasique cryogénique

Nicolas Fdida, Yves Mauriot, Lucien Vingert, Matthieu Nugue

ONERA, the French Aerospace Lab

Centre de Palaiseau, chemin de la Hunière, 91123 Palaiseau Cedex, France

nicolas.fdida@onera.fr

RÉSUMÉ. La connaissance des processus d'atomisation des jets cryogéniques est un élément primordial pour la maîtrise de la stabilité des moteurs-fusées à ergols liquides. Un boîtier de visualisation à froid (BVF) a été conçu pour étudier l'atomisation d'un jet d'oxygène liquide, en conditions non réactives, avec plusieurs diagnostics optiques simultanés. Une méthode de granulométrie par imagerie est mise en œuvre pour mesurer la taille de gouttelettes produites à proximité du jet d'oxygène liquide atomisé par un gaz concourant d'hélium ou d'azote gazeux à forte vitesse. Ce type de jet coaxial produit un nuage optiquement très dense composé de gouttelettes très rapides et de formes hétérogènes, ce qui les rend difficiles à sonder avec les dispositifs d'imagerie conventionnels. Deux objectifs de microscope à visée lointaine sont étalonnés et comparés en termes de résolution et de profondeur de champ, pour application à une mesure granulométrique sur le BVF.

ABSTRACT. The knowledge of atomization processes of cryogenic jets is one of the most important points to master the stability of rocket motors fed by liquid propellants. A Cryogenic Visualization Vessel (BVF) was designed to study the atomization of a single liquid oxygen jet, under non-reactive conditions, with simultaneous optical diagnostics. A drop-sizing method based on imaging is used to investigate the atomization of the liquid oxygen jet by a concurrent high-speed helium or nitrogen gas flow. This kind of coaxial jet produces a dense spray of heterogeneous and rapid droplets, particularly difficult to measure with conventional imaging devices. Two long-distance microscope objectives are calibrated and compared in terms of resolution and depth of field, for application to droplet size measurements on the BVF.

MOTS-CLÉS : écoulements diphasique, écoulements cryogéniques, ombroscopie, granulométrie, vélocimétrie.

KEYWORDS: two phase flows, cryogenic flows, shadowgraphy, drop-sizing, velocimetry.

DOI:10.3166/I2M.16.1-4. 229-253 © 2017 Lavoisier

1. Introduction

Dans une chambre de combustion de moteur-fusée à propergols liquides, les processus physiques tels que l'atomisation, le mélange ou la vaporisation des ergols sont complexes et peuvent interagir entre eux. Des instabilités thermo-acoustiques peuvent se développer dans les régimes de fonctionnement transitoire du moteur et conduire à sa détérioration. L'atomisation est un processus dominant qui pilote le comportement d'une telle flamme cryogénique, en particulier lorsque les ergols sont injectés dans des conditions dites sous-critiques définies entre autres par Candel *et al.* (2003). L'atomisation nécessite donc d'être étudiée en détail pour mieux prédire l'apparition de ces instabilités. La validation et l'initialisation des simulations numériques nécessitent des données expérimentales dans la zone d'atomisation proche de l'injecteur d'ergols (Murrone *et al.*, 2014 ; Vaudor 2015). Dans cette zone diphasique, la présence de la flamme rend les mesures et les simulations laborieuses, il est donc avantageux d'étudier isolément les processus physiques intervenant lors de la combustion pour les prédire de manière plus efficace.

Une nouvelle configuration expérimentale, présentée par Mauriot *et al.* (2016), est bâtie autour du banc Mascotte de l'Onera et permet d'étudier le phénomène d'atomisation du jet d'oxygène liquide (LOX) indépendamment de son interaction avec la flamme. Il s'agit d'une enceinte pressurisée et instrumentée qui couvre une large gamme de pressions de chambre, de débits et de températures des fluides, dans des conditions opératoires non réactives mais néanmoins représentatives d'installations industrielles en termes de conditions d'injection des fluides.

Ce type de jet d'oxygène liquide cryogénique et diphasique produit un spray particulièrement dense et difficile à sonder avec des techniques optiques de granulométrie conventionnelles telles que les techniques interférométriques qui ont pu être utilisées auparavant sur ce type de jet, par Gicquel et Vingert (2000) ou Fdida *et al.* (2016b). En effet la granulométrie par interférométrie phase Doppler fait l'hypothèse de la sphéricité des gouttes, ce qui peut poser question dans la zone proche de l'injecteur étudiée ici, puisque dans cette zone d'atomisation dite primaire, les particules de liquides se détachant du jet de LOX sont de formes hétérogènes. De plus, l'écoulement gazeux à grande vitesse produit des gouttelettes de LOX très rapides dont l'image doit être figée au moyen d'un temps d'exposition à la lumière très court. Pour limiter l'effet de bougé sur les images de gouttelettes, une source laser pulsée est utilisée pour éclairer le spray.

Nous choisissons donc d'utiliser une technique d'imagerie par rétro éclairage laser pour mesurer la taille des gouttelettes dans la zone d'atomisation du jet où très peu de particules sont de forme sphérique. Cet article décrit le principe et l'application d'un granulomètre par imagerie, développé par Fdida et Blaisot (2010) et appliqué à un jet de LOX atomisé par un gaz inerte (hélium ou azote).

2. Le banc Mascotte

2.1. Le boîtier de visualisation à froid (BVF)

Depuis plus de 20 ans, le banc Mascotte de l'ONERA a permis d'étudier expérimentalement les processus physiques élémentaires de la combustion cryotechnique (Habiballah *et al.*, 2006), comme l'atomisation des jets coaxiaux (Fdida *et al.*, 2016a). Le nouveau Boîtier de Visualisation à Froid (BVF), illustré sur la figure 1, a été conçu pour étudier l'atomisation d'un jet de LOX par un gaz concourant inerte (He ou N₂). Le BVF est compatible avec la tête d'injection du Boîtier à Haute Pression (BHP) qui sert habituellement aux essais de combustion sur le banc Mascotte.

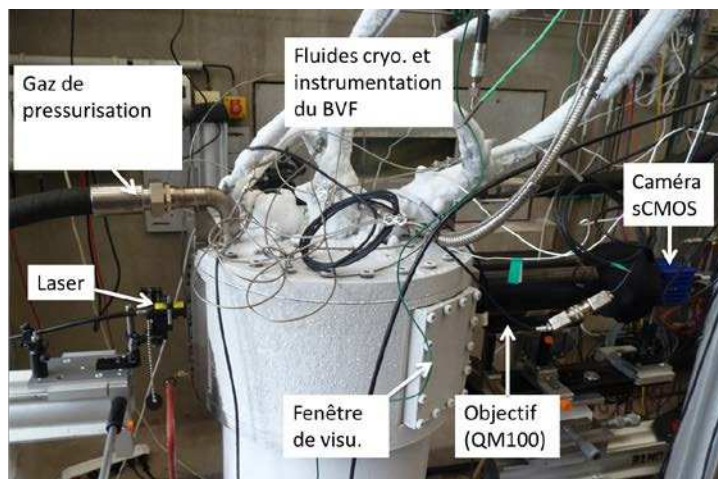


Figure 1. Visualisation d'ensemble du BVF et des diagnostics optiques en conditions cryogéniques

La ligne d'arrivée des fluides cryogéniques dispose d'une régulation de la température d'injection du gaz atomisant afin qu'elle soit aussi proche que possible de celle du LOX (différence inférieure à 5 K). Cet effet de la basse température de régulation se manifeste par les tuyaux givrés situés sur le dessus du BVF sur la figure 1.

L'injecteur coaxial est caractérisé par son diamètre interne DL par lequel le LOX est injecté, le jet de LOX est atomisé par une couronne de gaz inerte injectée à grande vitesse. L'injecteur dépasse à l'intérieur de la chambre, sur une distance de cinq fois son diamètre dans le champ de visualisation, permettant de réaliser des mesures optiques à proximité de la section de sortie. Les accès optiques sont de larges dimensions et sont disposés aux angles 0° , 90° , 180° et 235° . Le

positionnement angulaire de deux hublots est optimisé pour la diffusion avant de la lumière à 35° , les deux autres accès optiques sont utilisés pour l'imagerie par rétroéclairage. Ces quatre accès optiques permettent donc l'utilisation simultanée de l'imagerie par transmission et de l'interférométrie phase Doppler (Fdida *et al.*, 2016b). Un système de chauffage des fenêtres permet d'éviter le dépôt de givre sur leur face externe. De plus, les larges dimensions internes du BVF ainsi qu'un système de soufflage sur la face interne des hublots de visualisation permettent d'empêcher les gouttelettes de LOX d'impacter la face interne des hublots de visualisation.

2.2. Les points de fonctionnement étudiés

Les nombres sans dimension de Weber du gaz We_G et de Reynolds du liquide Re_L permettent de répertorier les différents processus de rupture d'après la cartographie dans le plan (We_G, Re_L) présentée par Lasheras et Hopfinger (2000). Le nombre de Weber a pour but de comparer les forces déstabilisatrices dues au différentiel de vitesse entre le jet liquide et l'écoulement gazeux par rapport aux forces de tension de surface. Le nombre de Reynolds du liquide caractérise le rapport des forces d'inertie face aux forces de viscosité. Afin de se rapprocher de la phénoménologie d'atomisation dans un moteur-fusée à ergols réels, les paramètres d'injection visés se veulent représentatifs d'un régime d'atomisation de type fibre, caractérisé par de fortes valeurs du nombre de Weber du gaz ($We_G > 10^3$), du nombre de Reynolds du liquide ($Re_L > 10^3$) et un rapport des flux de quantité de mouvement J du gaz et du liquide supérieur à 1. Deux conditions d'injection ont été définies, l'une utilisant comme gaz atomisant de l'hélium, l'autre de l'azote. Dans les deux cas, les conditions d'essai atteignent un nombre de Reynolds liquide $Re_L \approx 65\,000$, calculé sur le diamètre interne de l'injecteur de LOX DL , un nombre de Weber basé sur l'épaisseur de la veine gazeuse $We_G \approx 2000$ et un rapport de flux de quantité de mouvement $J \approx 1,5$. Les paramètres du banc d'essai montrent que les conditions d'atomisation sont donc bien de type régime fibre pour les deux gaz atomisants. Ce régime fibre, illustré par un cliché instantané sur la figure 2, est caractérisé par la création et la brisure dès la sortie de l'injecteur de très fines et courtes fibres liquides accrochées au jet continu. Ces fibres sont étirées à la surface du jet continu, situé sur la partie basse de la figure 2, constituant les zones les plus sombres de l'image. Suite à cet arrachage, le corps liquide est fortement modifié et se désintègre sous forme de filaments liquides qui, eux-mêmes, se cassent en libérant des gouttelettes visibles sur la figure 2 de droite. Les temps caractéristiques de rupture sont très courts, ce qui implique une atomisation rapide du liquide. Les gouttes produites sont de très petites tailles, un ordre de grandeur plus petit que les fibres se détachant du jet de LOX, et de plusieurs ordres de grandeurs inférieurs au diamètre d'injection, ce qui rend ce phénomène multi échelles.

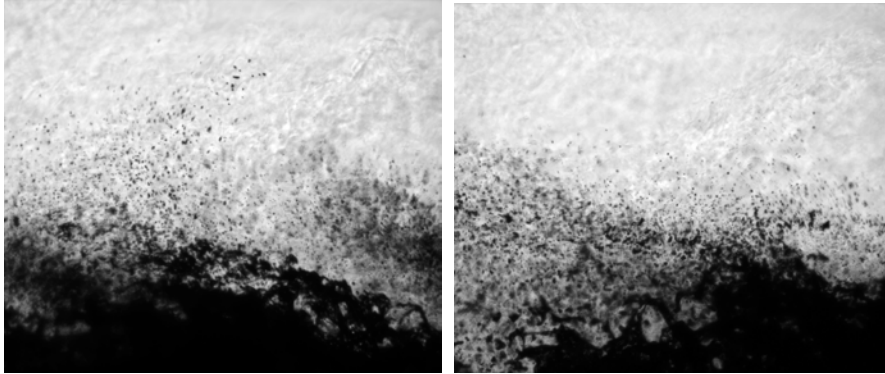


Figure 2. Images instantanées du régime d'atomisation de type fibre, LOX/N₂. Le spray se déplace de la droite vers la gauche. Champ de 100 mm² environ

3. Le système d'imagerie

Le dispositif d'imagerie par transmission sur l'axe est mis en œuvre autour du BVF, comme illustré sur la photographie de la figure 1. Le montage optique, dont l'arrangement est défini sur la figure 3, est constitué d'une source laser pulsée incohérente éclairant un spray dont l'ombre est projetée sur une caméra numérique. La distance de travail D_w est définie par la distance entre la pupille d'entrée de l'objectif et le plan de focalisation (X,Z) réglé sur l'axe vertical médian de l'injecteur de LOX assisté par hélium ou azote gazeux.

3.1. Le modèle d'imagerie

Le granulomètre par imagerie est basé sur un modèle de formation de l'image d'une goutte qui est le résultat du produit de convolution entre la réponse impulsionnelle incohérente du système optique par une fonction qui décrit la manière dont la goutte diffuse la lumière (voir Goodman, 1968). Le profil de goutte est assimilé à une gaussienne et la mesure de taille est déduite à une certaine hauteur du profil, choisie de manière à prendre en compte certains effets comme le défaut de mise au point de la goutte. Les détails et le choix de ce modèle sont rapportés dans la thèse de Fdida (2008). Une procédure d'étalonnage de ce granulomètre a aussi été développée, pour corriger le diamètre apparent des gouttes hors du plan de mise au point et augmenter ainsi le nombre de gouttes mesurées dans une image. Cette particularité du granulomètre par imagerie est un plus essentiel pour ce type d'application où le temps de production du nuage de gouttes est limité à la durée de fonctionnement du banc d'essai en conditions stationnaires, qui est de l'ordre de la minute.

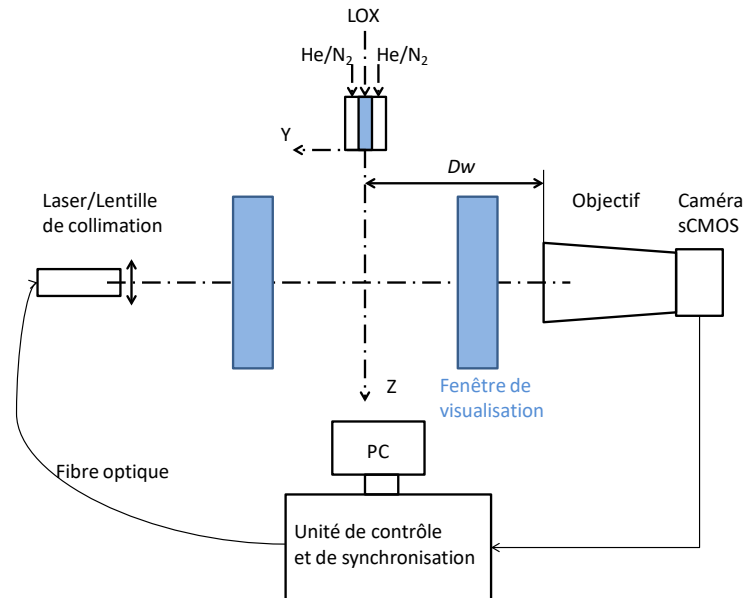


Figure 3. Schéma de principe du granulomètre par imagerie

La gamme de diamètre mesurable $[d_{min}, d_{max}]$ en millimètres est déterminée à partir du modèle d'imagerie de Fdida et Blaisot (2010), selon les équations (1) et (2) :

$$d_{min} = 0.806 \sqrt{\frac{4N_{pix\ min}}{R^2 \pi}} \quad (1)$$

$$d_{max} = \frac{l_{im}}{10R} \quad (2)$$

Où $N_{pix\ min} = 9$ est le nombre de pixels minimum de la surface d'une gouttelette, R la résolution du montage optique en px/mm et l_{im} la largeur de l'image en pixels.

3.2. Traitements d'images

Les étapes des traitements sont résumées dans cette section et le détail des opérations de traitement d'images est donné dans la thèse de Fdida (2008). La première étape de traitement des images consiste à enregistrer une image de référence du fond lumineux après chaque acquisition. Cette étape dite de normalisation permet de s'affranchir des inhomogénéités du fond lumineux qui peuvent être dues à des variations spatiales ou temporelles de l'éclairage. Ces

variations ne sont pas dues à la source mais à la condensation ou au givre qui peuvent apparaître en cours d'essai sur le trajet optique, malgré les précautions qui peuvent être prises comme le chauffage externe des fenêtres de visualisation. L'image du fond lumineux est enregistrée sans la présence du spray, comme illustré sur l'image centrale de la figure 4, en prenant comme niveau de référence le maximum de l'histogramme des niveaux de gris de l'image.

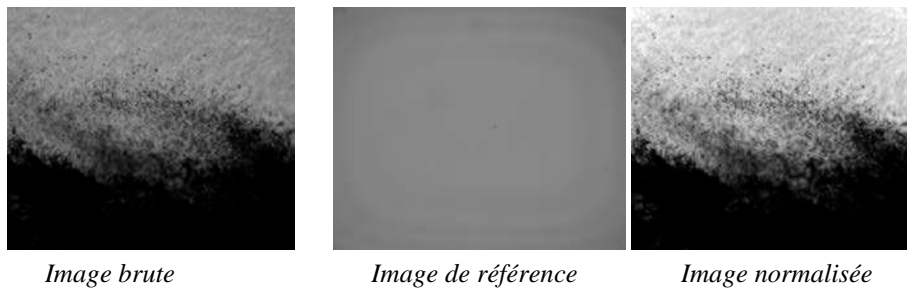


Figure 4. Etape de normalisation

Le calcul de l'image normalisée est illustré par la figure 4 et est déterminé par l'équation (3) qui est appliquée à chaque pixel de l'image brute $I(i,j)$:

$$I_N(i, j) = \alpha \frac{I(i, j) - I_O(i, j)}{I_R(i, j) - I_O(i, j)} N_{fond} \quad (3)$$

Avec $I_R(i,j)$ un pixel de l'image de référence, $I_O(i,j)$ un pixel de l'image d'obscurité, α un coefficient correcteur des fluctuations temporelles et N_{fond} le niveau représentatif du niveau de gris du fond lumineux. N_{fond} est défini comme étant le niveau le plus peuplé l'histogramme de niveaux de gris de l'image brute. De la même manière, une fois le niveau de gris le plus peuplé l'histogramme de niveaux de gris de l'image de référence est obtenu, α est calculé comme le rapport de ces deux niveaux représentatifs du fond lumineux.

Pour détecter les images de gouttelettes, un double seuillage est effectué : un seuillage classique défini à 40 % de la gamme de niveaux de gris (voir image de gauche sur la figure 5), adapté pour les gros objets, bien contrastés et un seuillage à partir d'une transformée par ondelettes (TO), dont l'effet est visible sur l'image centrale de la figure 5, qui permet de détecter les petits objets, moins contrastés. L'image de droite est la résultante des deux images seuillées, elle est obtenue en réalisant l'union mathématique des deux images binaires de la figure 5. Ensuite pour chaque particule isolée, on définit un masque d'analyse locale plus grand que la goutte, qui est affecté à une couleur propre, ce qui constitue l'étape de labellisation.

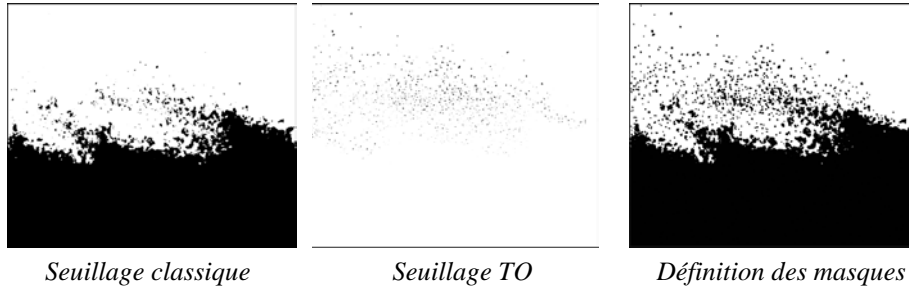


Figure 5. Etape de localisation des objets

Une analyse du masque local est réalisée sur chacune des images de gouttelettes et conduit à la liste des objets analysés et la liste des objets rejetés. Pour chaque objet conservé, les paramètres calculés sont la surface de la goutte, le diamètre (à surface équivalente à un disque), le contraste, sa position dans l'image... Ce programme fournit plusieurs diamètres, obtenus à différents niveaux de seuillage, ce qui permet de quantifier le défaut de mise au point de la goutte (*i.e.* la largeur de la zone floue) et de corriger le diamètre apparent de la goutte détectée. Toutefois cette correction a ses limites pour les forts défauts de mise au point et nécessite une phase d'étalonnage, propre à chaque objectif, pour être optimale. Ce programme élimine les objets inexploitable, par exemple ceux qui touchent le bord de l'image, comme le jet de LOX central qui apparaît au bas des images, ceux qui sont trop gros ou trop petits (inférieurs à neuf pixels en surface), trop proches d'un autre objet (lorsque les masques d'analyse se touchent), ou ceux qui présentent un contraste trop faible pour une analyse.

La majorité des gouttes est sphérique ou considérée comme telle. La granulométrie du spray est évaluée en premier lieu par les diamètres moyens D_{qp} . Les diamètres moyens sont définis dans l'équation (4) comme le rapport entre des moments de différents ordres de la distribution numérique de taille $f_n(D)$. Le D_{10} est dit arithmétique, il représente la moyenne classique, sans pondération, du diamètre des gouttes.

$$(D_{qp})^{q-p} = \frac{\int_0^{\infty} f_n(D) D^q dD}{\int_0^{\infty} f_n(D) D^p dD} \quad (4)$$

La distribution de taille est ensuite obtenue en comptabilisant les gouttes mesurées par classes de tailles, conduisant aux fonctions de densité de probabilité (pdf). Plus de détails sur la définition et la signification physique des paramètres de description de la granulométrie d'un spray peuvent être trouvés, par exemple, dans l'article de Sowa (1992).

3.3. L'étalonnage du granulomètre

L'étalonnage, propre à chaque système optique, a pu être réalisé directement à l'intérieur de la cellule de visualisation, à travers les accès optiques, grâce aux larges dimensions du BVF, selon l'arrangement de la figure 3. L'étalonnage est obtenu au moyen d'objets circulaires calibrés, déposés sur une fine lame de verre, disposant d'une mire graduée par ailleurs. Cette mire granulométrique dispose de deux séries de 11 disques gravés, de diamètre compris entre 10 μm et 300 μm . L'application et les résultats de cette procédure d'étalonnage sont détaillés dans la section 3.1 de la partie résultats.

3.4. Dimensionnement du système optique

3.4.1. Le grandissement

Plusieurs objectifs ont été testés en laboratoire, dans différentes configurations optiques pour identifier la plus adaptée à la mesure granulométrique sur le BVF. La taille typique attendue des éléments liquides se situe entre 10 μm et plusieurs centaines de micromètres. En prenant pour hypothèse un minimum de trois pixels pour mesurer le diamètre d'une goutte, l'objectif devrait atteindre une résolution d'environ 3 $\mu\text{m}/\text{px}$ pour mesurer les plus petits éléments liquides. La contrainte expérimentale la plus importante sur le choix d'un objectif pouvant atteindre une telle résolution est sa compatibilité avec les dimensions de l'enceinte BVF qui ne permettent de travailler qu'avec des objectifs à longue distance de travail D_w , définie sur la figure 3. D_w doit être supérieure au diamètre externe du BVF, 235 mm si le diamètre de la pupille d'entrée de l'objectif est inférieure à la largeur de la fenêtre de visualisation de l'enceinte BVF, sinon D_w doit être supérieur à 263 mm. C'est à la suite de ces tests qu'ont été retenus le microscope à visée lointaine K2 Distamax de Infinity, équipé d'un objectif CF1/B et le télescope de type Maksutov-Cassegrain QM100 de Questar, dont les distances de travail sont compatibles avec les dimensions du BVF.

Lors d'une expérimentation précédente (Fdida *et al.*, 2016a), une caméra haute cadence, équipée d'un capteur CMOS au format 25 mm x 16 mm, avec des pixels de 20 μm de côté, a été utilisée car sa haute cadence d'acquisition permet de suivre le phénomène d'atomisation à plusieurs milliers de kilohertz. Mais pour cette application nécessitant un fort grandissement, la caméra haute cadence a été abandonnée car la taille du pixel permet difficilement d'obtenir la résolution visée de 3 $\mu\text{m}/\text{px}$. Le choix d'une caméra munie d'un capteur de taille de pixel plus faible s'est donc imposé. La caméra retenue est la caméra sCMOS de LaVision (2016) qui bénéficie d'un large capteur 16 bit de 2560 x 2160 px² (14 x 16 mm²) dont le pixel mesure 6,5 μm de côté. Cette récente génération de capteur sCMOS présente une réelle alternative aux capteurs CCD et CMOS, avec un capteur d'une bonne résolution ainsi qu'une grande sensibilité, comparable aux CCD, tout en conservant

de bonnes performances en termes de cadence d'acquisition, comme le montre Coates (2011).

Le grandissement obtenu, défini par le rapport de la taille de l'image sur celle de l'objet, en tenant compte des contraintes dimensionnelles du banc d'essai, est d'environ 1,6 et 5,1, respectivement pour la configuration Infinity K2 et Questar QM100. La résolution finalement obtenue sur le BVF avec le Questar QM100, est de $1,3 \mu\text{m}/\text{px}$, produisant un champ d'étude d'environ 10 mm^2 . Le second montage optique retenu, le microscope à visée lointaine K2 Distamax de Infinity équipé d'un objectif CF1/B, fournit quant à lui un champ d'étude d'environ 100 mm^2 , avec une résolution de $4,1 \mu\text{m}/\text{px}$.

Les caractéristiques communes de ces objectifs sont une faible ouverture numérique, estimée à 0,1 et 0,075, ainsi qu'une faible profondeur de champ estimée à $55 \mu\text{m}$ et $90 \mu\text{m}$, d'après les données respectives des constructeurs Questar et Infinity prises dans les conditions d'essai, avec un éclairage visible à $\lambda = 640 \text{ nm}$ (voir section 3.4.2). Le diamètre minimal théorique discernable, défini en première approximation par la tâche d'Airy (due à la limitation en diffraction), est de $7,8 \mu\text{m}$ et $10,4 \mu\text{m}$, respectivement dans les configurations Questar et Infinity. Ces valeurs sont compatibles avec l'application de granulométrie envisagée.

3.4.2. La source d'éclairage

Les précédentes investigations (Fdida *et al.*, 2016a) réalisées avec un éclairage continu et une caméra haute cadence n'ont pas permis de figer nettement les images de gouttelettes en mouvement, dans des conditions d'atomisation inertes similaires, cela malgré un temps d'exposition de la caméra de $1 \mu\text{s}$ seulement. Un temps d'exposition plus faible s'est avéré nécessaire pour figer sur l'image les gouttes en mouvement, particulièrement à fort grandissement. C'est pourquoi une source laser pulsée a été retenue pour cette application.

La diode laser pulsée CAVILUX Smart™ 400 W, fournie par la société finlandaise Cavitar (2016), émet une radiation lumineuse rouge incohérente à $640 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$. Cette source très compacte fournit une impulsion lumineuse et stable dans le temps et dans l'espace, qui éclaire le jet de LOX par l'intermédiaire d'une fibre optique multimode à cœur liquide et est mis en forme par une lentille de collimation de focale 40 mm illustrée sur la figure 3. La stabilité de la position spatiale de la source est très appréciable dans cette application à fort grandissement, car des expérimentations similaires (Fdida *et al.*, 2010) ont montré qu'une lampe à arc utilisée dans ces conditions engendrait un nombre significatif de ratés et les fluctuations de la position de l'arc conduisaient à un nombre non négligeable d'images inexploitables.

La durée de l'impulsion lumineuse est réglable dans une large gamme entre 20 ns et $10 \mu\text{s}$, avec un pas de 10 ns . A la différence de la plupart des sources lasers, elle est peu cohérente, la lumière n'est donc pas diffractée lorsqu'elle illumine des gouttelettes de taille micronique. La cadence de répétition de l'impulsion est

réglable dans une large gamme allant de 25 Hz à 10 kHz en continu et jusqu'à 50 kHz sur une durée de 10 s. L'énergie contenue dans chaque pulse est fonction de la fréquence de répétition utilisée, au maximum de 5 mJ. La durée de l'impulsion est limitée par le rapport cyclique de 0,03 % de la fréquence de répétition. Dans notre application, la fréquence de 25 Hz est imposée par la caméra utilisée pour cette étude. A cette fréquence, la source peut fournir une impulsion de durée maximale de 12 μ s mais une durée de 30 ou 40 ns s'est révélée suffisante pour éclairer le champ visualisé. L'énergie contenue dans le pulse laser est estimée à environ 0.025 mJ dans ce cas. Dans ces conditions d'éclairage et de résolution, l'effet de trainée induit par le déplacement de la goutte pendant la durée du pulse a été estimée à environ un micromètre. L'utilisation de cette source pulsée permet donc de réduire cet effet de trainée d'un facteur 20 par rapport aux précédentes investigations (Fdida *et al.*, 2016a).

4. Résultats expérimentaux

4.1. Etalonnage du granulomètre par imagerie

Le granulomètre par imagerie requiert un étalonnage de la réponse impulsionnelle du système optique détaillé dans l'article de Fdida et Blaisot (2010). Dans cette section, les réponses des deux objectifs à visée lointaine sont comparées, en termes de résolution, de numérisation et de profondeur de champ. L'étalonnage est réalisé au moyen de la mire granulométrique, placée dans l'enceinte d'expérimentation. Cette phase d'étalonnage a été réalisée pour chaque objectif, à la suite de la campagne d'essais, mais pas dans les conditions opératoires thermodynamiques, car un accès à l'intérieur de la chambre est nécessaire.

4.1.1. L'objectif Infinity

La première étape de l'étalonnage consiste à estimer correctement le diamètre des gouttes, en prenant en compte leur défaut de mise au point (voir Fdida et Blaisot, 2010). L'étalonnage consiste à enregistrer des images de la mire granulométrique à plusieurs distances du plan de mise au point. Le rapport entre le rayon réel a et le rayon r_{61} estimé par le traitement d'image est relié au contraste normalisé C_0 de la goutte, suivant un modèle illustré en trait plein sur la figure 6. r_{61} est le rayon de la goutte mesuré à 61 % de la hauteur de son profil de niveau de gris, supposé gaussien. C_0 est défini par rapport aux niveaux de gris minimum et maximum enregistrés sur l'image de la goutte. Ensuite une courbe de régression polynomiale est calculée à partir des points expérimentaux pour adapter la correction au système optique utilisé. Cette courbe, en traits pointillés, est comparée au modèle en trait plein sur la figure 6, elle montre un bon accord entre le granulomètre et le modèle d'imagerie. Cette courbe de régression polynomiale, en pointillés sur la figure 6, dont l'équation est $a/r_{61} = 1,3125C_0^3 - 2,6585C_0^2 + 2,0861C_0 + 0,2238$ est ensuite appliquée au diamètre mesuré $2r_{61}$ pour corriger l'effet du défaut de mise au point. On constate que le disque de 10 μ m, en limite inférieure de

gamme de mesure est bien détecté par le système optique mais les points expérimentaux en rouge constituent les plus éloignés du modèle en traits pleins. La gamme de diamètre mesurable [d_{min} , d_{max}] du granulomètre par imagerie (montage Infinity) est donnée par les équations (1) et (2) et conduit à [11.1 μm , 889 μm].

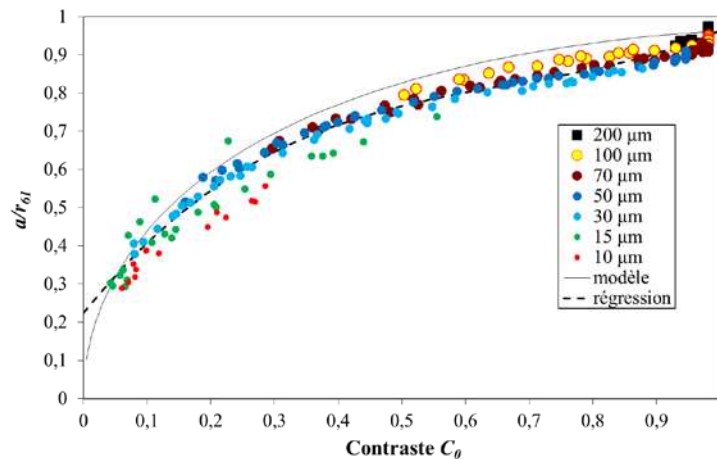


Figure 6. Courbe d'étalonnage de la correction du rayon a/r_{61} en fonction du Contraste C_0 , montage Infinity

L'erreur relative à la valeur réelle peut être évaluée par cet étalonnage étant donné que le rayon des disques a est parfaitement connu. La figure 7 montre le diamètre brut $2r_{61}$ de l'ensemble des disques calibrés par des symboles triangulaires creux, en fonction de la distance au plan de mise au point. De plus, le diamètre corrigé par le contraste est illustré sur la figure 7 par des symboles pleins, pour chaque disque de diamètre de 10 μm à 150 μm inclus, avec la régression polynomiale indiquée plus haut. La mesure du diamètre corrigé est à mettre en regard de chaque ligne pointillée horizontale qui symbolise le diamètre réel de chaque disque. La mesure pour chaque position de défaut de mise au point est obtenue à partir de l'image moyenne calculée sur 100 images successives. La répétabilité de la mesure est d'environ 1 % pour les plus gros disques et 2 % pour les disques les plus petits. L'erreur relative introduite par le système optique reste inférieure à 3 %, après correction du diamètre par le contraste, pour les objets de diamètre de 300 μm à 30 μm inclus, et cela dans un intervalle de défaut de mise au point de +/- 1 mm autour du plan de mise au point. Pour l'objet de 15 μm , la procédure a tendance à surestimer le diamètre réel, conduisant à une erreur systématique de 8 % et quelques détections ratées. Pour le disque de 10 μm , la mesure corrigée surestime systématiquement le diamètre réel et ne permet pas d'obtenir une erreur relative de moins de 15% en moyenne, correspondant à 1,5 μm en valeur absolue, dans une zone de défaut de mise au point de +/- 1 mm.

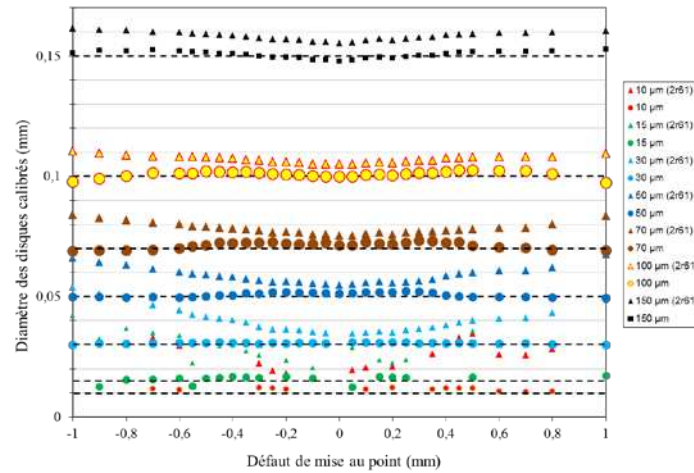


Figure 7. Effet de la correction du diamètre brut $2r_{61}$ (triangle creux) sur le diamètre corrigé (symboles pleins), montage Infinity

Dans le but de trier les gouttes relativement à leur position par rapport au plan de mise au point de l'objectif, le défaut de mise au point de chaque disque calibré est estimé au moyen d'une seconde courbe d'étalonnage, présentée sur la figure 8, qui montre l'évolution de la demi largeur de réponse impulsionnelle (RI) du système d'imagerie, en fonction du défaut de mise au point. En effet la largeur de la RI est liée à la position de l'objet circulaire par rapport au plan de mise au point, indépendamment de sa taille, comme l'illustre la figure 8, obtenue avec les disques calibrés. L'estimation de la largeur de réponse impulsionnelle de chaque objet circulaire est réalisée au moyen du modèle d'imagerie développé par Fdida et Blaisot (2010), basé sur des travaux de Pentland (1987) et de Ren *et al.* (1996). La variation de la largeur de la RI avec la distance au plan de mise au point a une forme en V particulière mise en évidence par Xiong et Shafer, 1993, qui est indépendante de la taille des particules. La valeur maximale acceptable de la demi largeur de RI obtenue dans le cas de ce montage optique est $RI_{max}=0.03$ mm. Cette valeur est illustrée sur la figure 8 par une ligne pointillée horizontale, elle conduit à la gamme de défaut de mise au point acceptable ΔY , sur laquelle la variation de la largeur de RI est considérée indépendante de la taille de l'objet. Cette valeur correspond à un défaut de mise au point acceptable $\Delta Y = \pm 0,35$ mm. Au-delà de cette valeur de défaut de mise au point, les disques les plus petits (10 et 15 μm) ne sont plus détectés et un biais est introduit dans la mesure granulométrique. Les gouttelettes du spray dont l'estimation de la demi largeur de RI est supérieure à cette valeur limite seront donc rejetées. La demi largeur de RI minimum théorique correspond à la limite de diffraction liée à la tâche d'Airy, qui est estimée dans le cas de ce montage optique à 4,9 μm (voir Fdida et Blaisot, 2010). Elle est plus faible que la demi RI mesurée expérimentalement, qui est d'environ 12 μm . On observe

que les abscisses positives et négatives de cette courbe en V ont des pentes sensiblement égales à 0,059.

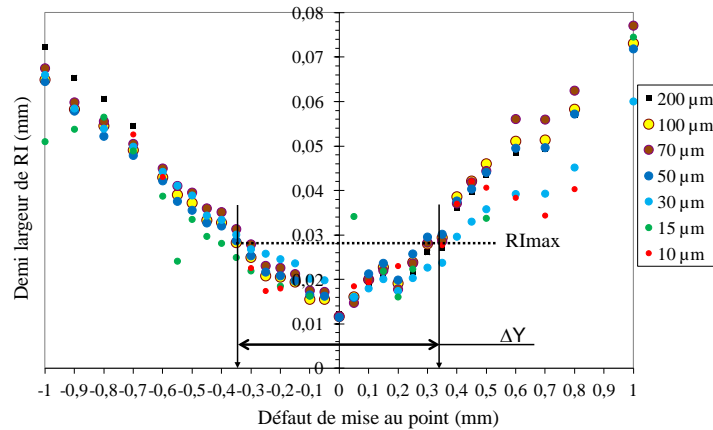


Figure 8. Evolution de la demi largeur de RI avec le défaut de mise au point, montage Infinity

4.1.2. L'objectif Questar

Les résultats de la phase d'étalonnage pour la correction du rayon brut r_{6l} sont donnés sur la figure 9. Cette figure regroupe l'ensemble des valeurs de rayons r_{6l} en fonction du contraste C_0 mesuré pour les objets de la mire granulométrique entre 10 et 300 μm , quel que soit le défaut de mise au point compris entre $\pm 0,5$ mm. Les résultats des disques de 150 à 300 μm , regroupés autour du point de coordonnées (1,1) ne sont pas représentés par soucis de clarté d'illustration. On constate que l'écart entre le modèle (trait plein) et les points expérimentaux (cercles noirs) est plus important que pour le montage Infinity et que le contraste minimum mesuré est plus élevé que pour le montage Infinity (voir figure 6). La courbe de régression polynomiale, en traits pointillés sur figure 9, est obtenue partir des données expérimentales et son équation est un polynôme d'ordre 3 : $a/r_{6l} = 1,5575C_0^3 - 3,1453 C_0^2 + 2,5118 C + 0,0563$, dont le coefficient R^2 est 0,98. La gamme de diamètre mesurable $[d_{min}, d_{max}]$ par le granulomètre par imagerie (montage QM100) est donnée par les équations (1) et (2) et conduit à $[2,9 \mu\text{m}, 283 \mu\text{m}]$.

L'erreur relative à la valeur réelle pour le montage QM100 est illustrée sur la figure 10 : le diamètre brut $2r_{6l}$ pour l'ensemble des disques calibrés est symbolisé par des triangles creux, en fonction de la distance au plan de mise au point alors que le diamètre corrigé par le contraste est illustré par des symboles pleins, pour les disques de diamètre entre 10 μm et 100 μm . La valeur réelle indiquée par une ligne pointillée horizontale montre que l'erreur relative introduite par ce système optique reste inférieure à 2 % en moyenne sur l'ensemble des disques calibrés, après correction du diamètre par le contraste, pour les objets de diamètre de 300 μm à

10 μm inclus, dans un intervalle de défaut de mise au point de $\pm 0,45$ mm autour du plan de mise au point. Pour l'objet de 10 μm , l'erreur est au maximum de 7 % et en moyenne de 4,2 % dans ce même intervalle de défaut de mise au point.

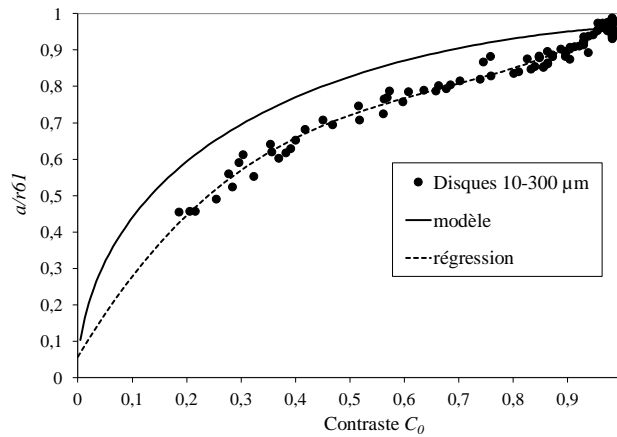


Figure 9. Courbe d'étalonnage de la correction du rayon a/r_{61} en fonction du Contraste C_0 , montage Questar QM100

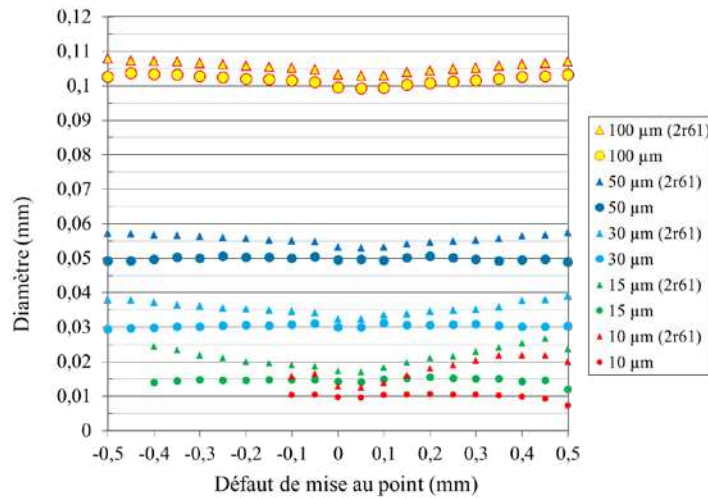


Figure 10. Effet de la correction du diamètre brut (triangles creux) sur le diamètre corrigé (symboles pleins), montage QM100

La seconde courbe d'étalonnage, qui concerne l'estimation du défaut de mise au point des disques calibrés de 10 à 300 μm est présentée sur la figure 11. La valeur maximale de la demi largeur de RI estimée par le modèle est de 8,7 μm , cette valeur

étant inférieure à la valeur minimale de la courbe expérimentale, il n'est donc pas possible d'en déduire un défaut de mise au point acceptable ΔY . De plus on observe une forte dissymétrie entre les branches positives et négatives par rapport au défaut de mise au point égal à zéro. La pente de la partie négative de la courbe en V est de 0,042 alors que la pente de la partie positive est de 0,045. Cette dissymétrie est probablement due au déplacement du chariot qui maintient la mire granulométrique lors de l'enregistrement des images d'étalonnage. Le balayage des positions de défaut de mise au point a été réalisé dans un premier temps depuis la position zéro vers les positions négatives puis dans un second temps depuis la position extrême positive vers la position zéro. La branche positive semble être la seule branche qui atteint la valeur de défaut de mise au point minimale à environ $11 \mu\text{m}$. Le microscope QM100 étant plus ouvert que l'Infinity, son défaut de mise au point varie plus vite. La valeur de la pente du QM100 est plus faible que celle de l'Infinity d'un facteur égal au rapport de leurs ouvertures.

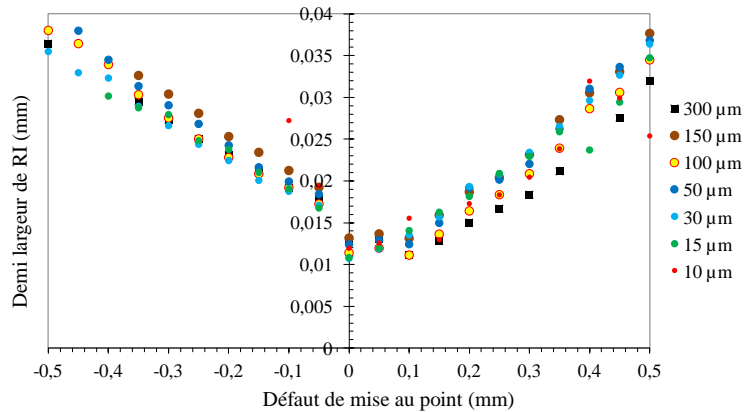


Figure 11. Evolution de la RI avec le défaut de mise au point, montage QM100

4.1.3. Influence de la numérisation

La caméra utilisée permet d'obtenir des images numérisées sur 16 bit, soit chaque pixel de l'image peut avoir un niveau d'intensité lumineuse compris entre 0 et 65 535. Cependant l'encodage en 16 bit double le poids d'une image par rapport au 8 bit, ce qui augmente sensiblement le temps d'analyse. Dans le but de minimiser l'occupation en mémoire des séries d'images ainsi que d'améliorer la vitesse d'analyse, les mêmes images numérisées en 16 bit et ré-encodées en 8 bit sont comparées pour évaluer l'intérêt de la numérisation 16 bit. Les courbes de régression polynomiale de la correction du rayon a/r_{6l} en fonction du contraste C_0 sont ainsi tracées pour les deux encodages sur la figure 12 (en traits plein rouges pour 8 bit et bleu pour 16 bit), dans le cas du montage Infinity. Les symboles représentant les disques calibrés de 30, 70 et 200 μm . Ces deux courbes de régression polynomiale (dont les coefficients R^2 sont de 0,98) présentent un écart

relatif très faible, avec des valeurs de a/r_{61} légèrement plus importantes pour la courbe 16 bit, comme illustré par l'encadré de la figure 12.

Afin d'évaluer si cet écart est significatif, une étude d'incertitude est réalisée. En premier lieu, l'incertitude sur le niveau de seuil du profil de la goutte est calculée. Le choix du niveau de seuil agit sur la taille apparente de la goutte : plus il se rapproche de l'intensité du fond lumineux, plus la surface des gouttes sera importante après binarisation. Ainsi, la valeur du niveau du fond lumineux est connue à $\pm 1\%$ et par propagation d'incertitude, la valeur du niveau de seuil choisi est aussi connue à $\pm 1\%$. Cette incertitude sur le niveau seuil a un impact plus important sur les petites gouttes (faiblement contrastées, donc à faible gradient de niveau) que sur les grosses (fortement contrastées). De plus, à cette incertitude se rajoute celle liée à la discrétisation spatiale, estimée à ± 0.5 px, qui est prise en compte dans la mesure de l'aire de la surface seuillée. Cette incertitude est négligeable pour les grosses gouttes, mais peut être significative pour les gouttes inférieures à $20\ \mu\text{m}$. La combinaison de ces deux incertitudes permet d'évaluer l'erreur sur le rapport a/r_{61} en fonction du contraste C_0 . En effet, l'incertitude sur la mesure du rapport a/r_{61} pour les gouttes faiblement contrastées est plus importante, autour de $\pm 4\%$, que celle sur les grosses gouttes, inférieure à $\pm 1\%$.

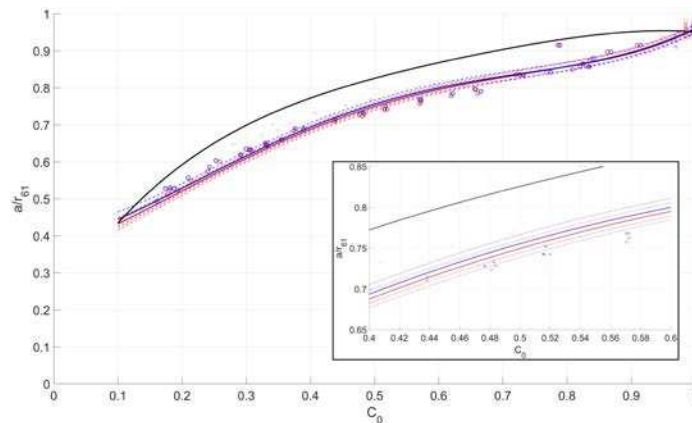


Figure 12. Courbe d'étalonnage de la correction du rayon a/r_{61} en fonction du contraste C_0 pour une numérisation 16 bit (bleu) et 8 bit (rouge), montage Infinity. Les courbes en pointillés correspondent aux intervalles de confiance sur l'interpolation

4.2. Etude du spray de LOX/N₂

4.2.1. Localisation des points de mesure

La visualisation en champ large sur la droite de la figure 13 a été réalisée lors d'une autre campagne d'essais sur le BVF, dans des conditions d'injection très

proches en termes de $We_G = 2500$ et $Re_L = 69000$, avec un système d'imagerie constitué d'une caméra haute cadence et d'un objectif de grandissement proche de l'unité qui ne sera pas détaillé ici. Le spray se déplace toujours dans le sens dans la plus grande longueur des images, mais cette fois-ci de haut en bas sur la figure 13. Cette image du spray cryogénique en champ large permet de positionner les images en champ proche utilisées pour cette expérimentation de granulométrie par imagerie. Les champs proches sont représentés dans le champ large par des cadres pointillés respectant le rapport de grandissement entre les champs proche et large. Le champ du Questar QM100 est représenté par un cadre en pointillés bleus et celui de l'Infinity en pointillés rouges, dans le même cas d'injection LOX/Azote. On observe que les images produites par l'objectif QM100 montrent une netteté très inférieure à celle de l'objectif Infinity. De plus, la phase d'étalonnage ayant aussi montré un plus faible contraste des images du QM100, nous avons choisi de concentrer nos efforts dans le traitement des images en vue de l'obtention de la granulométrie du spray cryogénique uniquement sur les images issues du montage Infinity, malgré son plus faible grandissement. Des pistes d'études sont en cours pour identifier les principales sources de ce bruit de mesure dans le montage QM100, qui n'apparaît pas aussi important sur les courbes d'étalonnage. L'image en champ proche présentée sur la figure 16 est l'une des rares à faire apparaître assez distinctement des structures liquides. On distingue parfois quelques structures liquides quasiment nettes mais en majorité des grosses structures floues proches du jet.

En outre deux cercles verts illustrent le positionnement du volume de mesure d'un Interféromètre Phase Doppler (PDI), commercialisé par Artium, qui est utilisé ici comme comparaison avec le granulomètre par imagerie, dans une zone assez éloignée du jet pour ne pas se trouver en contradiction avec l'hypothèse de sphéricité du PDI. Les détails sur la mise en œuvre de ce système de granulométrie PDI ont été présentés par Fdida *et al.* (2016b).

La précision du positionnement (de l'ordre du millimètre pour un champ de 100 mm^2) des images en champ proche dans l'image en champ large ou du volume de mesure du PDI est assurée par un objet gradué, se fixant mécaniquement sur le manchon externe de l'injecteur. Cet objet est positionné dans la chambre une fois que les deux fenêtres qui se trouvent sur le trajet optique du système optique sont en place. Au préalable, la mise au point de chaque système d'imagerie a été réalisée sur le tranchant d'une lame de rasoir placée dans le plan vertical d'injection, parallèlement au plan de l'image. Un système de déplacement 3 axes de la caméra, solidaire de son objectif, permet de positionner le centre de l'image dans le repère de l'injecteur, de diamètre interne DL , à $z/DL \approx 4$ du plan de sortie de l'injecteur, dans l'axe vertical d'injection. La position radiale du champ proche vise ensuite la zone d'atomisation, à l'aplomb de la couronne d'azote gazeux. Cette couronne de gaz est visible proche de l'orifice d'injection du liquide sur le champ large de la figure 16. La procédure d'étalonnage, décrite dans la section 3.1, est réalisée à l'aide de la mire granulométrique à la fin de la campagne d'essai.

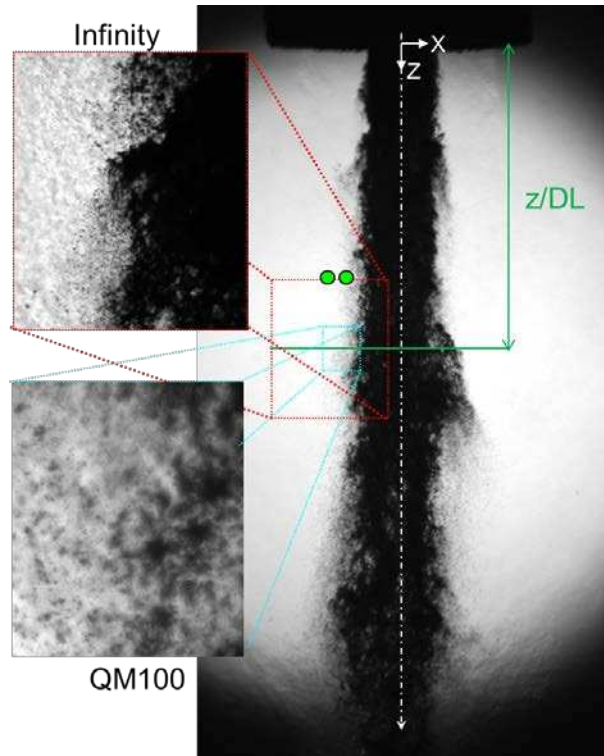


Figure 13. Illustration des champs visualisés par imagerie, injection LOX/N₂.
 A droite : champ large, à gauche : montage QM100 (cadre bleu) et Infinity (cadre rouge)

4.2.2. Granulométrie du spray LOX/N₂, montage Infinity

Les programmes de granulométrie par imagerie sont appliqués à 4 séries de N.image (≈ 750 images) obtenues avec le montage Infinity, lors d'une même journée d'essai, sur différentes rafales successives, dans les mêmes conditions opératoires ($We_G = 2000$ et $Re_L = 65000$). Les résultats sont regroupés dans le tableau 1. Le tableau 1 fait aussi apparaître en comparaison deux jeux de données obtenus par le système PDI, dans des conditions opératoires similaires ($We_G = 2500$ et $Re_L = 69000$) pour une comparaison avec le granulomètre par imagerie. Les diamètres présentés dans le tableau 1 sont adimensionnés par un diamètre de référence D_{ref} par soucis de confidentialité. La sphéricité Sp et l'ellipticité ε sont des paramètres de forme de la goutte, le premier tend vers 0 et le second tend vers 1 à mesure que la forme tend vers un disque. L'ellipticité ε est définie par le rapport de la largeur sur la longueur du rectangle dans lequel la goutte est inscrite. La sphéricité représente le rapport de la différence entre l'union et l'intersection de la surface de la goutte et celle du disque de même surface.

Tableau 1. Récapitulatif des mesures granulométriques, en conditions LOX/N₂, montage Infinity

Série	N2a	N2a'	N2b	N2c	N2d	N2e	N2f
Montage optique	Infinity					PDI	
<i>RI max</i> (μm)	30	0,7 <i>D</i> ^{0.6} -0,015				-	-
N. Image	751	751	749	751	751	-	-
N. gouttes	11 355	77 334	61 982	64 715	60 937	22 673	17 068
<i>D</i> ₁₀ / <i>Dref</i>	0,16	0,34	0,37	0,36	0,37	0,25	0,31
<i>D</i> ₃₂ / <i>Dref</i>	0,20	0,51	0,57	0,56	0,56	0,32	0,39
Sphéricité	0,27	0,308	0,316	0,311	0,315	-	-
Ellipticité	0,79	0,753	0,759	0,760	0,759	-	-

Une importance particulière est donnée aux rejets pour cause de défaut de mise au point dépendant du paramètre *RI max* défini dans la section concernant l'étalonnage. Deux critères de tri de défaut de mise au point des gouttes sont utilisés pour la série N2a : *Rimax* = 0,03 mm, tel qu'obtenu lors de la phase d'étalonnage, et un critère dépendant du diamètre d'équation $Rimax = 0,7.D^{0.6} - 0,015$. On constate que dans le premier cas (*Rimax* = 0,03 mm), le *D*₁₀ est de 15,8 μm, ce qui est proche de la valeur du *D*_{min} mesurable (11 μm). Dans ce cas où *Rimax* = 30 μm, sur la totalité des gouttes détectées par le système d'imagerie (31 6951 éléments liquides), seules 3 % des gouttes sont validées (11 355 gouttes), car 24 % ont été éliminées pour cause de contraste trop faible, 70 % sont considérées comme en défaut de mise au point (demi *RI* > 30 μm), 1,5 % sont éliminées pour leur gradient de niveau de gris et 0,2 % pour être en dehors de la gamme de diamètre [1 ; 107] μm, choisie pour être identique à celle du PDI. Les rejets pour cause de défaut de mise au point sont trop importants du fait d'un biais dans la mesure de la demi *RI* des gouttelettes, que l'on illustre sur la figure 14, où est représentée la demi *RI* d'un échantillon de 50 000 gouttelettes en fonction de leur diamètre corrigé par le contraste. Sur la figure 14, une première ligne pointillée horizontale (*Rimin* = 0,012 mm) correspond à la valeur minimale de *RI* mesurable avec ce système d'imagerie, issue de la phase d'étalonnage. On retrouve bien cette valeur pour certaines petites gouttes mais pas pour les gouttes de plus de 30 μm de diamètre au contraire des disques calibrés, illustrés par des cercles rouges sur la figure 14. La seconde ligne pointillée horizontale (*Rimax* = 0,03 mm) représente le critère de tri en défaut de mise au point maximum issu de la courbe d'étalonnage de la figure 8, or ce critère élimine la quasi-totalité des images de gouttelettes détectées. On propose donc un critère de tri différent, prenant en compte la dépendance de la *RI* minimum avec le diamètre mesuré. Cette dépendance, que l'on n'observe pas avec les disques calibrés est probablement due à l'aspect tridimensionnel des gouttelettes, par rapport aux disques calibrés. Ce biais déjà observé dans de précédentes utilisations du

granulomètre, semble amplifié par la pression régnant dans le BVF. On propose donc un critère de RI_{max} modifié dont l'équation est issue de la régression en puissance de l'échantillon de point (en trait plein sur la figure 14) : $RI_{max}(D) = 0,6D^{0,6} - 0,0015$. Cette équation vérifie le critère de RI_{max} pour le plus petit diamètre, obtenu lors de la phase d'étalonnage : $RI_{max}(D_{min}) = 0,03$ mm et prend en compte la dépendance en puissance de la RI des gouttes en fonction de leur taille. Sur la figure 14, la limite A illustre le fait que les gouttelettes sont de moins en moins mesurables à mesure qu'elles s'éloignent du plan de mise au point, ce qui confirme expérimentalement l'importance de définir un critère de RI max.

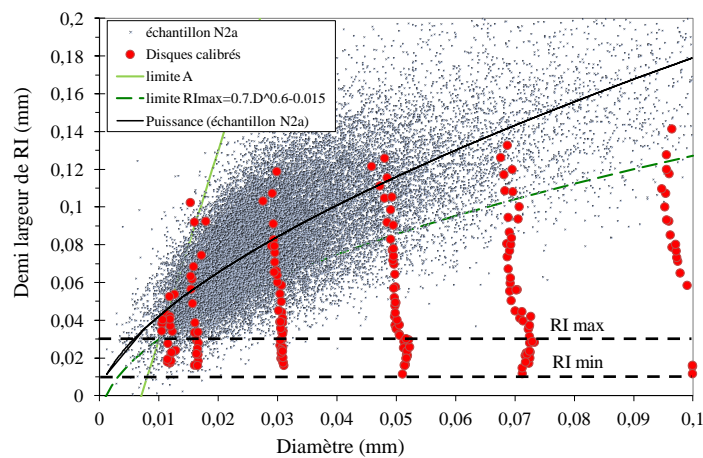


Figure 14. Réponse Impulsionnelle (RI) des gouttes en fonction de leur taille, montage Infinity

Une fois ce critère de tri modifié mis en place, les diamètres moyens D_{10} et D_{32} présentés dans le tableau 1, sont comparés aux diamètres mesurés par le PDI. Les pdf numériques de tailles $fn(D)$ correspondantes aux séries présentées dans le tableau 1 sont regroupées sur la figure 15. La fonction $fn(D).\Delta D$ représente la probabilité de rencontrer une goutte de taille D dans le spray. On constate qu'avec le critère de RI modifié, les valeurs de diamètres moyens ainsi que les pdf sont relativement en bon accord avec les mesures PDI. De plus, pour comparer les distributions numériques temporelles obtenues par PDI et les distributions numériques spatiales obtenues par imagerie, une transformation tenant compte de la vitesse des gouttes est nécessaire, en toute rigueur. En effet, dans le cas d'un spray qui est inhomogène spatialement, les mesures spatiales associées au volume de l'imagerie, plus grand que celui du PDI, intégreront les inhomogénéités spatiales. D'autre part, même dans le cas d'un spray homogène, les granulométries obtenues par ces méthodes peuvent être différentes du fait d'une éventuelle corrélation entre le diamètre et la vitesse des gouttes, comme l'ont montré Dodge *et al.* (1987).

L'existence d'une telle corrélation devra être vérifiée dans la perspective de ces travaux.

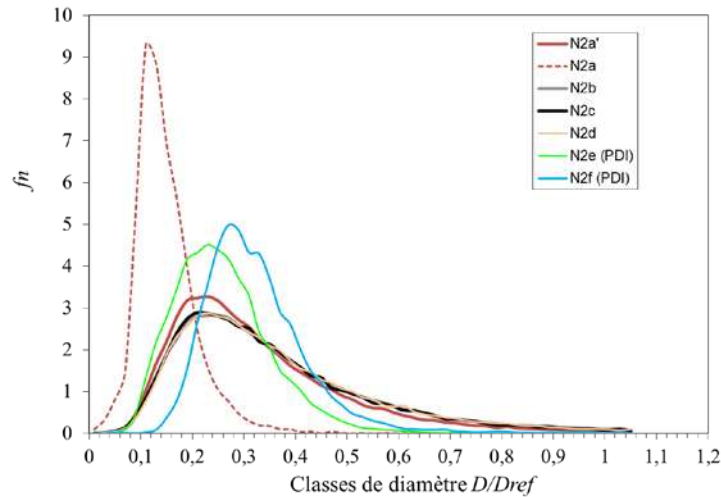


Figure 15. Pdf numériques obtenues pour différents cas : montage Infinity ou PDI

4.3. Etude du spray de LOX/He

Pour étudier l'effet du gaz atomisant, des images du jet de LOX atomisé par de l'hélium gazeux ont été effectuées. L'image en champ large présentée sur la figure 16 a été obtenue dans des conditions d'injection LOX/hélium, proches de celle à l'azote, pour ce qui est du $Re_L = 69000$, et un $We_G = 800$ qui est un peu plus faible. L'image en champ large montre un jet plus large dans ce cas d'atomisation à l'hélium. Les images en champ proche sur la gauche de la figure 16 ont été obtenues avec l'objectif QM100 (cadre pointillé bleu) et l'Infinity (cadre pointillé rouge). Pour conserver des conditions d'atomisation en régime fibre, proches de celles de l'azote, la pression dans le BVF a dû être augmentée fortement de manière à respecter la condition de similitude sur les nombres sans dimensions de Reynolds et Weber entre l'atomisation à l'azote et à l'hélium. Il en résulte des images trop floues pour être traitées par le granulomètre par imagerie. L'effet de la pression est incriminé pour expliquer l'aspect flou de ces images, que ce soient celles obtenues avec le montage Infinity ou le QM100. Cet effet de la pression n'a pu être pris en compte lors de la phase d'étalonnage et il conviendra de mieux appréhender cet effet pour l'imagerie dans ces conditions de chambre sous pression.

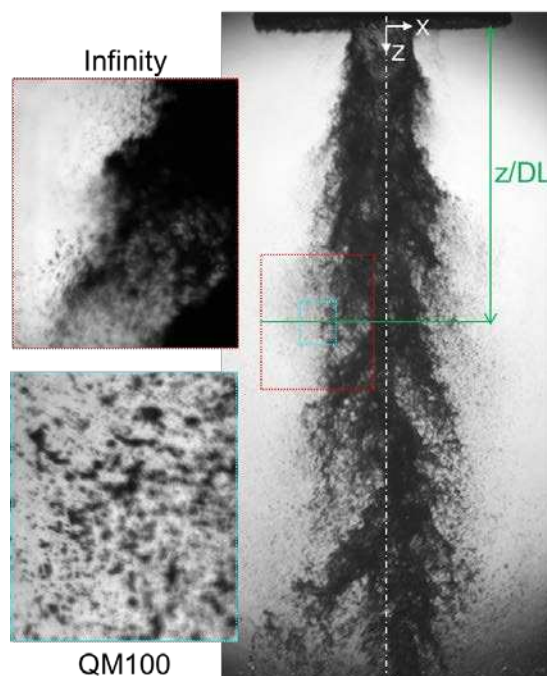


Figure 16. Illustration des champs visualisés par imagerie, injection LOX/He.
A droite : champ large, à gauche Montage QM100 (trait bleu) et Infinity (rouge)

5. Conclusion

Deux dispositifs d'imagerie par transmission sont décrits dans le but d'étudier l'atomisation des jets cryogéniques. Ces deux objectifs à grande distance de travail et fort grandissement ont une faible profondeur de champ, évaluée par une étape d'étalonnage utilisant des disques micrométriques calibrés. Des deux conditions opératoires étudiées, seul le jet de LOX atomisé par l'azote gazeux a donné lieu à des images exploitables pour une mesure granulométrique quantitative. De plus, le montage QM100 n'a pas fourni des images suffisamment contrastées et nettes pour mener une exploitation granulométrique. Dans le cas du jet de LOX atomisé par l'hélium, l'effet de la pression de chambre a rendu les images inexploitable pour les deux montages optiques envisagés. Malgré tout, le figeage des structures liquides sur les images a sensiblement été amélioré en utilisant une source pulsée qui a permis de réduire le temps d'exposition d'un facteur 20, par rapport au montage précédent utilisant une source continue.

La procédure d'étalonnage décrite dans cet article doit être réalisée dans les mêmes conditions que lors des essais, et donc dans l'idéal, dans les conditions de température et de pression du gaz dans la chambre identiques à celles de l'essai, ce

qui n'est actuellement pas possible techniquement. L'effet de la pression dans la chambre induit un flou dans les images qui n'a pas été pris en compte. En particulier, les essais en conditions d'injection LOX/hélium ont été réalisés à une pression dans la chambre plus forte que dans les conditions d'étalonnage et de mise au point, qui ont été réalisés à la pression atmosphérique. Les perspectives de ce travail sont de prendre en compte l'effet de la pression dans la procédure d'étalonnage.

Si aucun résultat quantitatif n'est montré en conditions d'injection LOX/hélium, des mesures granulométriques ont été obtenues en injection LOX/N₂ avec le montage optique Infinity. Ces mesures granulométriques semblent montrer des résultats encourageants pour caractériser les fines gouttelettes arrachées du jet de LOX dans la zone d'atomisation primaire. Les effectifs obtenus dans les durées de fonctionnement du banc imparties lors de cette campagne d'essais semblent suffisants pour donner une tendance sur la granulométrie. Les résultats de cette étude confirment donc la faisabilité de l'utilisation de cette technique de mesure dans des conditions d'injection non réactives de moteurs-fusées, ce qui constituait la priorité de ce projet.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les équipes en charge des mesures optiques et de l'instrumentation du banc Mascotte qui ont participé à cette étude expérimentale : Eric Paux, Frank Vannier et David Carru.

Bibliographie

- Candel S., Juniper M., Scouflaire P., Rolon C., Clauss W., Klimenko D., Oschwald M., Vingert L. (2003). Investigations of subcritical and transcritical cryogenic combustion using imaging and laser techniques. *In 5th International Symposium on Space Propulsion*, Chattanooga, USA, p. 27-30.
- Coates C. (2011). New sCMOS vs. current microscopy cameras. *Biophotonics International*, vol. 18, n° 5, p. 24-27.
- Cavitar (2016). *Cavilux™ Smart for High-Speed illumination*, <http://www.cavitar.com/cavilux-laser-illumination-products/cavilux-smart>
- Dodge L. G., Rhodes D. J., Reitz R. D. (1987). Drop-size measurement techniques for sprays: comparison of Malvern-Diffraction and aerometrics Phase/Doppler. *Applied Optics*, vol. 26, n° 11, p. 2144-2154.
- Fdida N. (2008). *Développement d'un système de granulométrie par imagerie. Application aux sprays larges et hétérogènes*. Thèse en Energétique, Université de Rouen, France.
- Fdida N., Blaisot J.-B., Floch A., Dechaume D. (2010). Drop size measurement techniques applied to gasoline sprays. *Atomization and Sprays*, vol. 20, p. 141-162.
- Fdida N., Blaisot J.-B. (2010). Drop size distribution measured by imaging: determination of the measurement volume by the calibration of the point spread function. *Measurement Science Technology*, vol. 21.

- Fdida N., Vingert L., Ristori A., Le Sant Y. (2016a). Drop size and velocity measurements in a cryogenic jet flame of a rocket type combustor using high-speed imaging. *Atomization and Sprays*, vol. 26, n° 5, p. 411-438.
- Fdida N., Mauriot Y., Vingert L., Ristori A., Godel S., Théron M. (2016b). Caractérisation de l'atomisation d'un jet d'oxygène liquide assisté par azote gazeux au moyen de diagnostics optiques. *Actes du Congrès Francophone de Techniques Laser, CFTL'16*, Toulouse, France.
- Gicquel P., Vingert L. (2000). Flow investigations of cryogenic sprays in combustion at sub and supercritical conditions. *Actes de la 16^e Conférence ICLASS*, Darmstadt, Allemagne.
- Goodman J. W. (1968). *Introduction to Fourier Optics*. Editions McGraw-Hill, New York.
- Habiballah M., Orain M., Grisch F., Vingert L., Gicquel P. (2006). Experimental studies of high-pressure cryogenic flames on the Mascotte facility. *Combustion Science and Technology*, vol. 178, p. 101-128.
- Infinity (2016). *Model K2 DistamaxTM long distance microscope*, <http://www.infinity-usa.com/products/instruments/Model-K2-DistaMax.aspx>
- Lasheras J. C., Hopfinger E. J. (2000). Liquid jet instability and atomisation in a coaxial gas. *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 32, p. 275-308.
- LaVision (2016). *CCD and sCMOS Cameras*, http://www.lavision.de/en/products/cameras/ccd_and_scmos_cameras.php
- Mauriot Y., Fdida N., Vingert L., Godel S., Ristori A., Théron M., (2016). Characterizing coaxial primary atomization without combustion on the MASCOTTE test bench. *Thermoacoustic Instabilities in Gas Turbines and Rocket Engines: Industry meets Academia*, Munich, Allemagne.
- Murrone A., Fdida N., Le Touze C., Vingert L. (2014). Atomization of cryogenic rocket engines coaxial injectors. Modeling aspects and experimental investigations. *Space Propulsion 2014*, COLOGNE, Germany.
- Nugue M., Devillers R.W., Le Besnerais G., Cesco N. (2016). Particle detection & size evaluation in solid propellant flames via experimental image analysis to improve two-phase flow simulation in rocket motors. *Actes de la conférence Space Propulsion*, Rome, Italie.
- Pentland A. P. (1987). A new sense for depth of field. *IEEE Transactions on PAMI*, vol. 9, n° 4, p. 523-531.
- Questar Corporation (2016). *Long distance microscope QM100*, <http://www.questar-corp.com/qm100.htm>
- Ren K. F., Lebrun D., Özkul C., Kleitz A., Gouesbet G., Gréhan G. (1996). On the measurements of particles by imaging methods: theoretical and experimental aspects. *Part. Part. Syst. Charact.*, vol. 13, p. 156-164.
- Sowa W.A. (1992). Interpretating Mean Drop Diameters Using Distribution Moments. *Atomization and Sprays*, vol. 2, p. 1-15.
- Vaudor G. (2015). *Atomisation assistée par un cisaillement de l'écoulement gazeux. Développement et validation*. Thèse en Energétique, Université de Rouen, France.
- Vision Research (2016). *Phantom[®] Camera v711 Overview and specifications*, <https://www.phantomhighspeed.com/french/Cameras-Rapides/Gammes/Série-v/v711>
- Xiong Y., Shafer S.a. (1993). Depth from focusing and defocusing. *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*.

