

Etude de la cavitation dans une buse d'injection transparente

Marc MICHARD¹, Cyril MAUGER et Loïc MEES

Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique - LMFA UMR 5509

Ecole Centrale de Lyon – Insa de Lyon – Université Claude Bernard Lyon 1

36 Avenue Guy de Collongue - 69134 Ecully Cedex

1 Introduction

1.1 Importance de la cavitation dans les injecteurs diesel

Dans les moteurs diesel, le carburant est fortement pressurisé et pulvérisé en fines gouttelettes dans la chambre de combustion. Les buses d'injection sont constituées des très petits orifices au travers desquels le liquide est fortement accéléré pour favoriser la fragmentation du jet liquide à la sortie. L'écoulement dans les orifices peut dans certaines conditions être le siège d'un changement de phase (liquide/vapeur), c'est le mécanisme de cavitation. Ce phénomène trouve son origine dans la présence de zones où la pression chute localement en deçà de la pression de vapeur saturante ; de telles zones sont généralement associées à la présence de décollements. Le rétrécissement brusque à l'entrée de l'orifice induit ce décollement et une contraction (*vena contracta*) de l'écoulement (Figure 1). La cavitation peut alors se produire dans les zones de recirculation où les plus basses pressions apparaissent. La cavitation dans les buses d'injection a déjà fait l'objet d'études dans des géométries modèles d'injecteur transparent [1] [2]. Ces travaux ne permettent toutefois pas de faire directement un lien entre la cavitation et la fragmentation du jet liquide; en effet, les visualisations de l'écoulement dans l'orifice et dans le spray ne sont pas réalisées au cours d'un même cycle d'injection, ou le sont avec une résolution trop faible pour pouvoir dégager des corrélations. De tels liens ont bien été établis plus récemment [3-4], mais uniquement dans des modèles d'orifice de grandes dimensions. Des travaux récents [5-6] montrent que pour une géométrie fixe, la cavitation peut prendre naissance dans les couches de cisaillement plutôt que dans les zones de recirculation, par l'intermédiaire de processus instationnaires de type instabilité de Kelvin-Helmholtz. Pour des géométries réelles d'injecteur, d'autres processus plus complexes tels que les « string » de cavitation peuvent mettre en jeu un couplage entre plusieurs canaux d'injection. Finalement, si le phénomène de cavitation dans les injecteurs est connu depuis de nombreuses années, les conditions de son apparition sont encore mal comprises et nous manquons de données expérimentales précises à confronter aux modèles numériques.

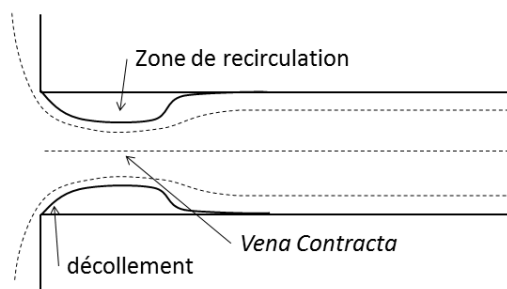


Figure 1. Décollement à l'entrée de l'orifice d'injection

1.2 Objectifs du travail

Dans ce travail, on cherche à étudier les conditions d'apparition de la cavitation dans des buses modèles mono-trou et transparentes au moyen de visualisations susceptibles d'être comparées à

¹ Correspondant : marc.michard@ec-lyon.fr

des simulations numériques. Une première étape consiste à mettre au point une technique d'imagerie en transmission adaptée à l'écoulement (dimensions, vitesse,...). Cette technique de visualisation, décrite dans la *Section 2*, est utilisée dans la *Section 3* pour étudier l'influence de paramètres géométriques tels que le rayon de courbure à l'entrée de l'orifice ou sa conicité, ou encore l'influence d'une injection pilote. La *Section 4* montre des résultats plus prospectifs de visualisation simultanée de la cavitation dans l'orifice et du spray visant à établir des liaisons quantitatives entre les caractéristiques morphologiques de ce dernier et la présence de cavitation. La possibilité d'une mesure de la pression sac par voie optique est également évoquée.

2 Dispositif expérimental

2.1 Injecteur de série modifié et buses transparentes

Pour un injecteur de série, la buse d'injection est métallique et ne permet donc pas la visualisation directe de l'écoulement interne. Afin d'utiliser des techniques optiques, la buse d'injection a été usinée de manière à dégager l'extrémité de l'aiguille. Une pièce en PMMA constituée d'un unique canal d'injection précédé d'un volume de sac est alors fixée sur la buse usinée, par collage sur une pièce métallique intermédiaire. Dans toutes les expériences, le diamètre du sac est $D=1,2$ mm, le diamètre de l'orifice d'injection est $d=200$ μm ; sa longueur est $L=800$ μm . Avec une géométrie parfaitement symétrique, une technique d'imagerie en transmission ne permettrait pas de visualiser les contours des poches de cavitation. En effet de telles poches se développant en proche paroi sur toute la périphérie de l'orifice le rendraient totalement noir à l'observation. C'est pourquoi l'axe du canal est volontairement décentré de 50 μm par rapport à l'axe du sac, afin de provoquer une asymétrie permettant de mieux localiser la limite liquide/ vapeur dans l'orifice.

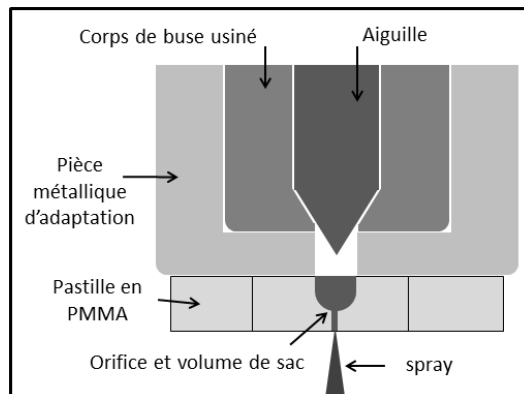


Figure 2. Schéma d'une buse transparente montée sur un injecteur usiné.

Pour analyser l'influence de différents paramètres géométriques tels que le rayon de courbure à l'entrée de l'orifice ou sa conicité, différentes buses ont été réalisées. Leurs caractéristiques géométriques sont consignées dans le *Tableau 1*. L'injecteur est par ailleurs muni d'un capteur de levée d'aiguille qui permet de mesurer cette dernière en temps réel.

	Diamètre de l'orifice (μm)	Rayon de courbure à l'entrée de l'orifice (μm)	Conicité de l'orifice: $c=(d_{in}-d_{out})/L$	Longueur de l'orifice (μm)	Diamètre du sac (μm)
Canal de référence : R	200	50	0	800	1200
Canal sans rayon de courbure à l'entrée : R0	200	0	0	800	1200
Canal avec une conicité : C	212	50	0.015	800	1200

Tableau 1. Paramètres géométriques des différents canaux d'injection

2.2 Boucle hydraulique

La boucle hydraulique utilisée est classiquement composée d'un réservoir, d'un filtre, d'un échangeur de chaleur, d'une pompe haute-pression entraînée par un moteur électrique, d'un « common rail », d'un système de régulation de pression, de l'injecteur haute pression muni d'une buse transparente et d'un dispositif d'extraction de brouillard. Le fluide utilisé est un fluide de calibration ISO 4113. Afin de limiter les effets de réfraction, l'indice du fluide est adapté à celui du PMMA par l'ajout de bromonaphtalène à proportion volumique de 18%. Cette adaptation d'indice est réalisée à pression et à température ambiante. Pour toutes les expériences présentées ici, la consigne de pression rail est fixée à 25MPa, sauf mention contraire.

2.3 Montage optique pour l'imagerie par transmission

2.3.1 Particularités de l'écoulement

L'écoulement étudié présente plusieurs particularités qui induisent des contraintes sévères sur le dispositif optique utilisé pour l'imagerie en transmission:

- **des dimensions caractéristiques très petites** : les dimensions de l'orifice ($d=200\ \mu\text{m}$ et $L=800\ \mu\text{m}$) nécessitent l'utilisation, à relativement grande distance (20 cm), d'un objectif à fort grossissement.
- **des vitesses très élevées** : pour la pression d'injection adoptée ici (25 Mpa), la vitesse théorique de Bernoulli est de l'ordre de l'ordre de $240\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Le temps de transit du fluide dans l'orifice est donc de l'ordre de $3,3\ \mu\text{s}$. Pour figer l'écoulement lors d'une visualisation, il est donc nécessaire de disposer d'une source de lumière dont la durée est au moins 100 fois plus faible, soit quelques dizaines de ns. De plus il est souhaitable que l'éclairage soit incohérent pour limiter les effets de speckle.
- **des variations importantes d'indice de réfraction** : pour les expériences présentées ici, la pression dans le sac varie typiquement entre 0,1 et 25 MPa. Ces variations de pression induisent des variations de masse volumique et donc d'indice de réfraction du fluide. Ce mécanisme, *a priori* indésirable, est surtout visible dans le volume de sac où les variations de pression sont importantes et peut de plus être mis à profit pour suivre les évolutions de la pression sac par voie optique.
- **un écoulement mixte de type interne/externe** : l'écoulement à l'intérieur de la buse doit être visualisé à travers 10mm environ de PMMA. Au contraire, la mise au point sur le spray est réalisée dans l'air. Avec le fort grossissement dont nous avons besoin, il n'est pas possible de faire la mise au point simultanément sur les écoulements interne et externe à l'aide d'une seule caméra.

2.3.2 Source de lumière et optique de réception

La première source de lumière utilisée (*Figure 3*, à gauche) est constituée d'un continuum de lumière blanche. Il est généré par un plasma, réalisé par focalisation d'un faisceau laser pulsé (YAG doublé, 532 nm, 6 ns, 40 mJ). Avec ce dispositif, on obtient un éclairage incohérent, intense (de l'ordre de quelques μJ) et très bref. La lumière de ce continuum est ensuite filtrée (filtre passe-bas, fréquence de coupure à 510 nm) qui permet d'éliminer les résidus de lumière laser cohérente diffusée par le plasma; la lumière est ensuite collimatée en direction de l'injecteur transparent. Typiquement, le spectre d'émission possède une largeur de 100 nm centrée autour de 450 nm (*figure 3* en haut à droite); la durée très brève de l'impulsion lumineuse, de l'ordre de 18 ns (*figure 3* en bas à droite), permet de figer l'écoulement sur les images en dépit des vitesses élevées.

L'inconvénient de ce dispositif est que le temps nécessaire au renouvellement du plasma à l'aide d'une seconde impulsion laser est nettement supérieur au temps de transit de l'écoulement dans l'orifice ; il n'est donc pas possible d'utiliser le principe de double exposition pour réaliser un suivi de bulles, de poches de cavitation ou des mesures de vitesse par inter-corrélation d'images. Un second dispositif a donc été développé à cet effet; il consiste à focaliser le faisceau du laser sur une pastille de PMMA fluorescent. L'éclairage incohérent ainsi obtenu a une durée assez proche de celle générée par le plasma (12 ns); le spectre d'émission est par contre décalé vers le rouge

(100 nm centré sur 600 nm). L'éclairage incohérent obtenu avec le PMMA fluorescent peut être doublé grâce à un laser YAG à deux cavités avec un intervalle de temps très bref entre les deux impulsions. Cette fonctionnalité n'a pas été exploitée dans le cadre des travaux présentés ici, mais pour des raisons pratiques et chronologiques, les visualisations présentées ont été réalisées avec l'une ou l'autre des sources lumineuses.

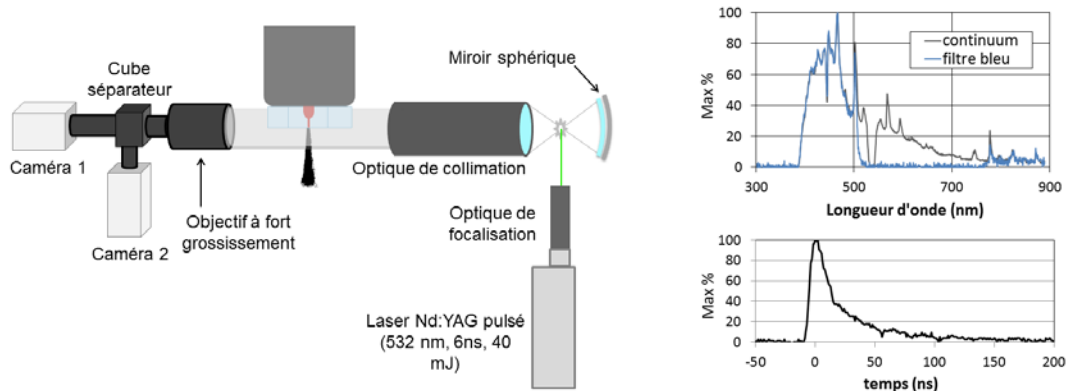


Figure 3. Schéma du dispositif pour l'imagerie par transmission – caractéristiques de l'éclairage

L'optique de réception est constituée d'une lunette à fort grossissement (Questar QM100). Nous utilisons 2 caméras distinctes, montées sur le microscope à visée lointaine, pour des raisons d'encombrement et de respect des angles de visualisation. Les images sont formées à l'aide d'un cube séparateur et la différence entre les distances objets est compensée par l'ajustement des distances images, en reculant davantage l'une des caméras. Chaque image est numérisée à l'aide d'un capteur CCD (2048x2048 pixels²). Typiquement, les champs visés par les deux caméras ont des dimensions de l'ordre de 2,5x2,5 mm², soit un facteur de grandissement proche de 1,3 $\mu\text{m}/\text{pixel}$. On notera toutefois que ce facteur est toujours légèrement plus faible pour l'image du spray que pour l'image de l'orifice, en raison de la nécessaire adaptation des distances de mises au point évoquées plus haut.

3 Résultats

3.1 Influence des paramètres géométriques

3.1.1 Cas de référence R

La Figure 4 (à gauche) montre l'évolution temporelle de la levée d'aiguille. Le temps $t=0$ correspond au début du signal d'activation de l'injecteur, qui dure 2000 μs . Seule la partie de la mesure située au-dessus de la zone grisée correspond à un déplacement effectif de l'aiguille. En effet, en début et en fin d'ouverture, l'aiguille subit une déformation élastique sous l'effet de la pression, alors qu'elle est en contact avec son siège et que le fluide ne s'écoule pas. Pour la pression d'injection utilisée ici, l'effet de compression induit un déplacement supplémentaire de 22 μm et l'ouverture effective de l'aiguille débute au temps $t=350 \mu\text{s}$.

La même Figure 4 (à droite) présente des images instantanées obtenues à différents instants t (lors de différents cycles d'injection). Les images enregistrées par les deux caméras (écoulements internes et externes) sont accolées l'une en dessous de l'autre. Sur ces images, la phase liquide est en gris dans l'écoulement interne, tandis que la phase vapeur apparaît en noir. Par contre, dans l'écoulement externe, le jet liquide et les gouttes résultant de la fragmentation de ce dernier sont en noir, et l'air ambiant apparaît en gris.

Au moment de l'ouverture de l'aiguille ($t=350 \mu\text{s}$), le canal contenant initialement du liquide se remplit partiellement d'air par effet d'aspiration. Ce phénomène permet d'identifier le début effectif de la levée d'aiguille. Un peu plus tard, à $t=400 \mu\text{s}$, on distingue une structure typique de la phase d'accélération en tête du jet liquide ; ce dernier a néanmoins conservé son caractère axisymétrique. Lorsque l'aiguille est suffisamment levée ($t=1000 \mu\text{s}$ et $2000 \mu\text{s}$), une poche de cavitation apparaît dans la partie droite du canal d'injection, du côté opposé au décentrement de

l'orifice. Le décollement est en effet plus important de ce côté où l'angle entre la paroi du sac et celle de l'orifice est plus grand. De manière corrélée, on observe une fragmentation plus importante dans la partie droite que dans la partie gauche du jet liquide. Enfin, au moment de la fermeture de l'aiguille ($t=3200 \mu s$), l'image montre un régime de fragmentation lié à la rapide décélération du liquide.

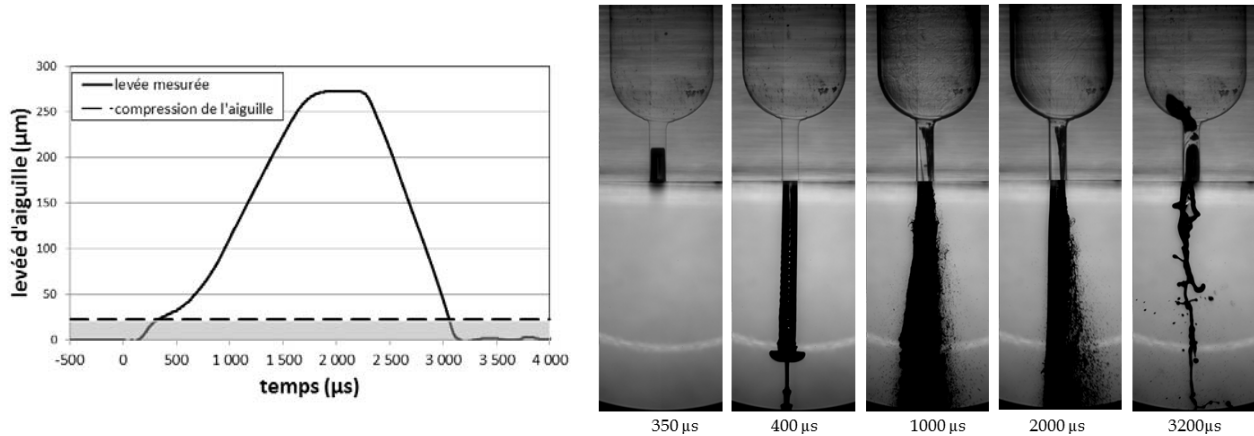


Figure 4. Levé d'aiguille et images instantanées des écoulements interne (sac et orifice) et externe (jet liquide, spray) ; cas de référence R

3.1.2 Influence du rayon de courbure (cas R0) et de la conicité (cas C)

La Figure 5 présente des images moyennes obtenues à partir de 50 cycles d'injection et pour les différentes géométries du Tableau 1. Pour un rayon de courbure à l'entrée de l'orifice de $50 \mu m$ (cas R, en haut) la cavitation apparaît à partir de $t=800 \mu s$, sous une forme sombre, en haut et à droite de l'orifice. Au-delà de $t=800 \mu s$, la localisation et l'extension spatiale de cette zone n'évoluent plus, jusqu'à la fermeture de l'aiguille. Pour un rayon de courbure nul (cas R0 au milieu), la cavitation apparaît plus rapidement et se développe davantage. La réduction du rayon de courbure amplifie le décollement et favorise l'apparition de la cavitation. On note que la poche de cavitation n'est plus confinée à droite de l'orifice. Elle s'étend à toute la périphérie, bien qu'elle reste davantage développée à droite où l'angle et le décollement sont plus importants. Enfin, dans la partie haute des images, on note un assombrissement au niveau des parois du volume de sac au fur et à mesure que l'on avance dans le temps. Ce phénomène est lié à l'augmentation de la pression sac et sera discuté plus en détail dans la Section 4.2.

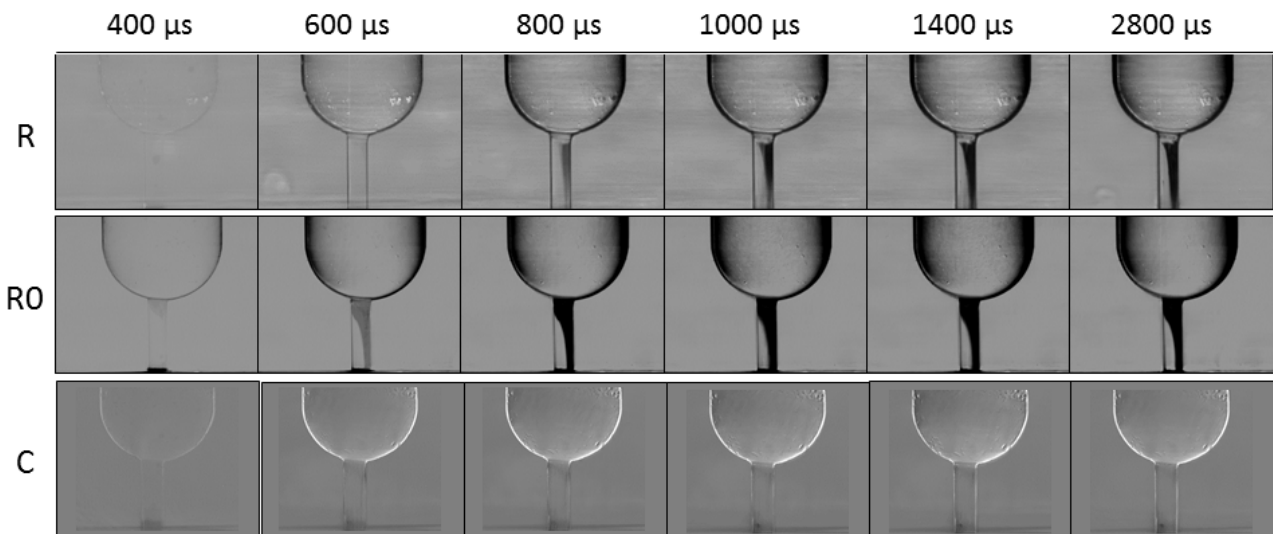


Figure 5. Evolution des images moyennes pour le cas R de référence (en haut), le cas R0 sans rayon de courbure (au centre) et le cas C avec conicité (en bas)

Enfin, la *Figure 5* montre également la séquence d'images moyennes obtenues pour l'orifice conique (cas C, en bas). Le caractère convergent du canal conduit à la disparition de la cavitation, en raison de la diminution de l'angle à l'entrée de l'orifice. Pour des pressions d'injection supérieures (40 Mpa) une poche de cavitation est observée, mais ses dimensions sont très réduites et elle reste confinée à l'entrée du canal. Notons que les visualisations ont été réalisées avec l'éclairage bleu dans les buses R et R0 et l'éclairage orangé dans la buse C.

3.2 Influence d'une injection pilote

Les stratégies d'injection des injecteurs modernes comportent une ou plusieurs injections pilote, qui précèdent l'injection principale. Nous avons donc réalisé des images dans la buse R pour une injection principale de 2000 μs , précédée ou non d'une injection pilote d'une durée de 600 ou 800 μs (durée du signal d'activation), démarrant 2000 ou 2200 μs avant l'injection principale. On présente sur la *Figure 6* une série d'images instantanées pour un des cas étudiés. Il apparaît que l'écoulement est cavitant au maximum de la levée d'aiguille lors de l'injection pilote ($t = -1200 \mu\text{s}$), et que des bulles d'air remontent dans l'orifice et le sac entre les deux injections ($t = -800 \mu\text{s}$). Lorsque l'injection principale débute ($t=400 \mu\text{s}$), des bulles d'air sont toujours piégées dans le volume de sac. La poche de cavitation est déjà présente à $t=600 \mu\text{s}$, plus tôt qu'avec une injection principale seule (cf, *Figure 5*). Au plateau de l'injection principale ($t=2300 \mu\text{s}$), la cavitation est pleinement développée.

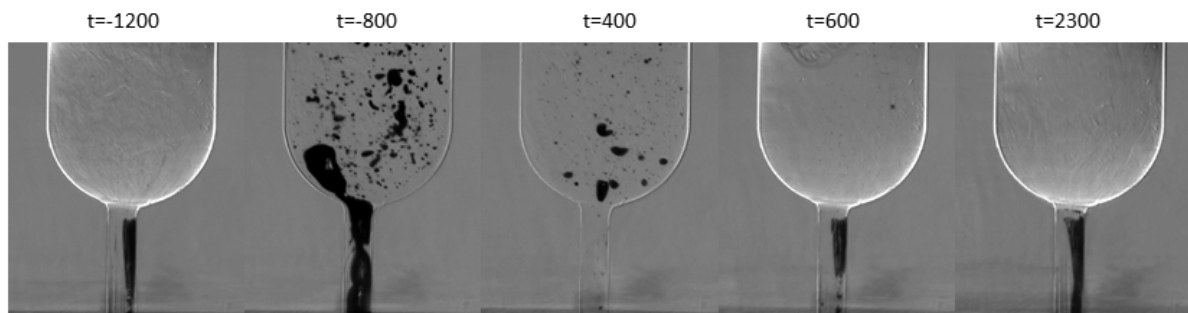


Figure 6. Images instantanées corrigées de l'image de fond (injection pilote de 600 μs démarrant 2000 μs avant l'injection principale ; l'ouverture de l'aiguille est à $t= 350 \mu\text{s}$)

La *Figure 7* présente l'évolution des probabilités de cavitation mesurées pour les 4 stratégies d'injection, au début de l'injection principale, entre 300 μs (en rouge) et 800 μs (en vert). Cette probabilité est obtenue par binarisation et sommation des images instantanées, après une correction par une image de fond. Toutes les visualisations ont ici été réalisées avec l'éclairage orangé. De façon générale, les stratégies avec injection pilote montrent une cavitation plus précoce lors de l'injection principale, d'environ 100 à 200 μs . Des différences entre les 3 cas présentant une injection pilote sont visibles mais moins marquées et plus difficiles à interpréter. Plus tard au cours de l'injection principale, au-delà de $t=1000 \mu\text{s}$ quand la cavitation est pleinement développée, on ne constate plus de différences entre les schémas d'injection. Les effets d'une injection pilote, limités aux aspects temporels, ne semblent pas pouvoir être attribués à un effet sur la dynamique de levée d'aiguille, qui ne montre pas d'écarts notable d'un schéma d'injection à l'autre. Il semble par conséquent que le déclenchement précoce de la cavitation soit lié à la présence de bulles dans la buse, entre les deux injections.

4 Perspectives

4.1 Corrélation spray/cavitation

Les images de la *Figure 4* indiquent une corrélation entre la présence d'une poche de cavitation dans l'orifice et la fragmentation du jet liquide en aval de cette poche. Cette conclusion nécessite néanmoins d'être validée par une quantification précise de la morphologie du spray (angle, taille de gouttelettes,...) et de la cavitation dans l'orifice (taille et localisation des poches), ainsi que la recherche de corrélations entre ces paramètres. Pour être pertinentes, ces corrélations doivent

être établies à partir d'images des écoulements interne et externe décalées temporellement, ce que permet notre dispositif.

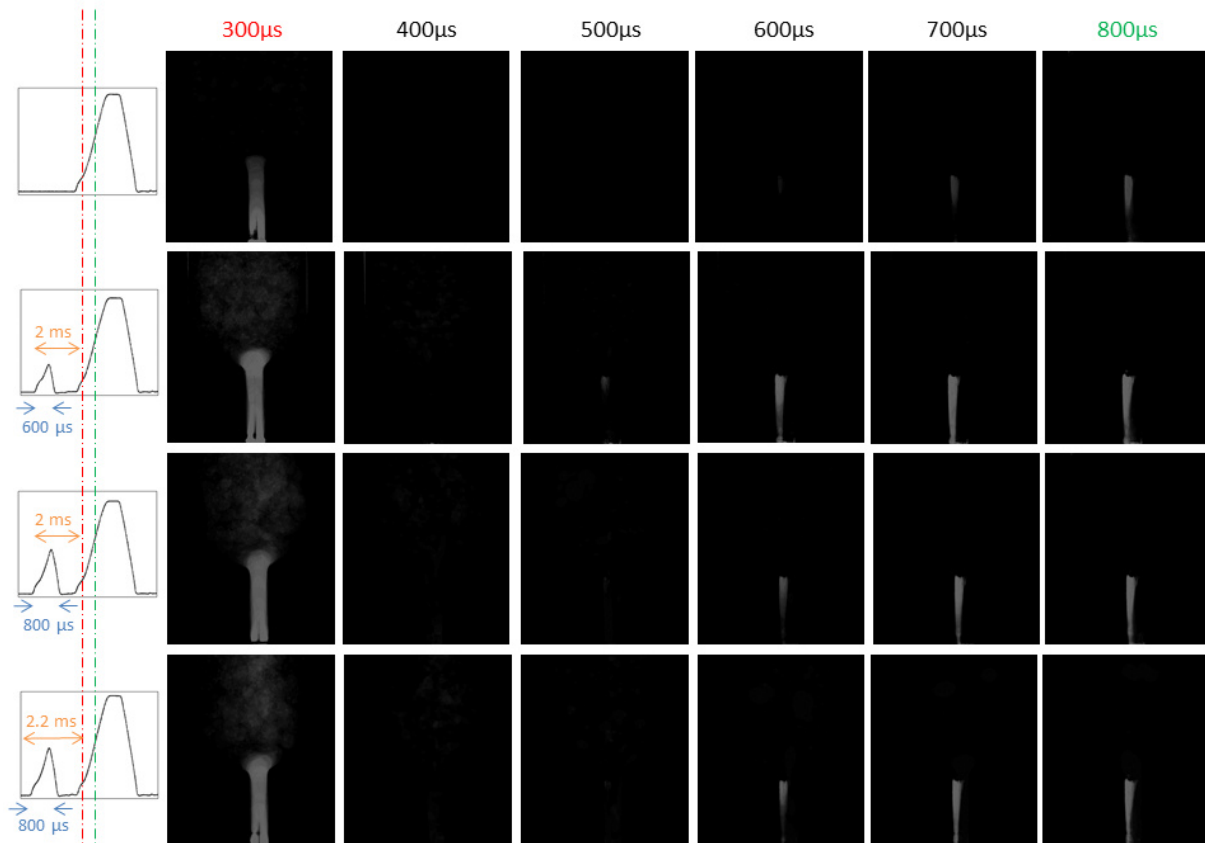


Figure 7. Probabilité de cavitation au début de l'injection principale pour différents délais t de 300 à 800 μs et pour 4 schémas d'injection (de bas en haut : injection principale seule, injection pilote de 600 μs à -2000 μs , injection pilote de 800 μs à -2000 μs et injection pilote de 800 μs à -2200 μs)

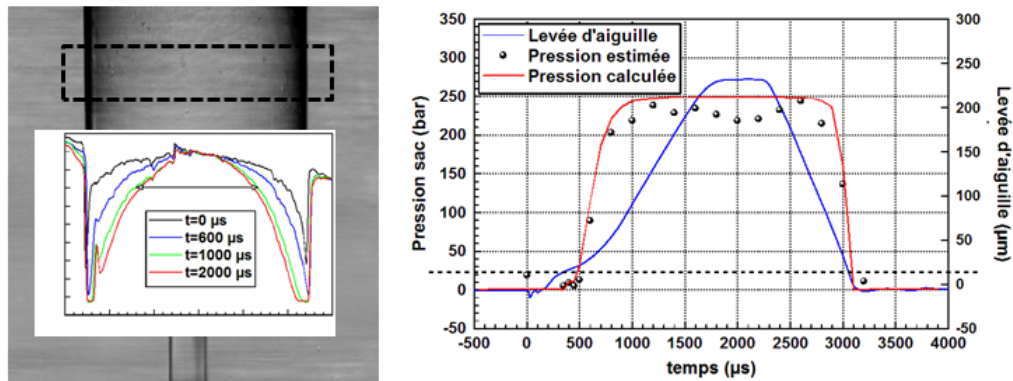


Figure 8. Profil d'intensité lumineuse dans le sac (à gauche) – Evolution temporelle (à droite) de la levée d'aiguille, de la pression sac estimée optiquement et calculée.

4.2 Evolution de la pression dans le sac

La Figure 4 montre que l'accord d'indice initialement réalisé à température et à pression ambiante par adjonction de bromonaphtalène est relativement satisfaisant, puisque pour $t=400 \mu\text{s}$ (à l'ouverture de l'aiguille), les différences de luminosité au niveau des parois du sac sont faibles. L'assombrissement des images aux frontières du sac pour des valeurs supérieures de t est un effet de réfraction lié à l'augmentation de la différence d'indice entre le fluide et le PMMA. Cette variation d'indice résulte de l'augmentation de la pression du fluide et de sa densité. Cet effet de réfraction peut *a priori* être mis à profit pour suivre l'évolution de la pression sac de manière non intrusive (optique). La Figure 8 (à gauche) montre l'évolution temporelle du profil d'intensité

lumineuse mesurée dans le sac de la buse R avec l'éclairage bleu, et moyennée verticalement dans la zone en pointillé sur la figure. A l'instant initial, l'effet de réfraction est faible. Par contre, après ouverture de l'aiguille, l'augmentation de la pression sac provoque une amplification de cet effet et le profil d'intensité prend une forme de cloche de plus en plus prononcée. On peut convenir de définir une largeur de ce profil (à 80% de sa valeur maximale par exemple) et de faire une hypothèse (très forte) de linéarité entre la pression et cette largeur pour obtenir une estimation de la pression sac. La *Figure 8* (à droite) montre les évolutions comparées de la levée d'aiguille, de la pression ainsi estimée (et recalée entre 0 et 250 bars en absence de calibration). Cette estimation est comparée à la pression sac prédite à l'aide d'un code CFD par CD-Adapco (partenaire du programme NADIA_bio), à partir des géométries de la buse et de l'aiguille et de la mesure de sa levée. L'évolution de la pression estimée paraît tout à fait compatible avec la prédiction issue de la simulation numérique. Ces résultats préliminaires ouvrent des perspectives intéressantes vers une mesure non-intrusive de la pression sac dans de telles géométries. Cependant l'absence de calibration et l'hypothèse de linéarité adoptée demandent une étude plus approfondie.

5 Conclusions

Un dispositif expérimental a été mis en place afin de visualiser l'apparition de la cavitation dans un injecteur modèle, mono-trou et transparent. Des montages optiques spécifiques ont été développés afin de concilier les impératifs liés à la résolution spatiale, la courte durée des impulsions lumineuses et le minimum d'énergie requis pour les visualisations. Ces dispositifs permettent de visualiser simultanément l'écoulement interne cavitant et le spray en proche sortie d'orifice, avec une qualité d'image et des résolutions spatiales et temporelles inégalées. Les résultats montrent que la présence d'un rayon de courbure à l'entrée de l'orifice, ainsi que la conicité de ce dernier, limitent le développement de la cavitation. De même, on montre que l'existence d'une injection pilote peut induire une apparition plus précoce de la cavitation lors de l'injection principale.

Il convient maintenant d'exploiter les possibilités des dispositifs optiques pour une analyse plus fine de la corrélation entre la présence de cavitation dans l'orifice et la morphologie du spray. A cet effet, la possibilité d'introduire un décalage temporel entre les images de l'écoulement interne et celles du spray sera mise à profit. Il serait également souhaitable de confronter la mesure de la pression sac par voie optique avec une mesure directe et/ou à partir d'une modélisation des effets de réfraction dans le sac.

Références

- [1] C. Badock, R. Wirth, C. Tropea, «The influence of hydro-grinding on cavitation inside a diesel injection nozzle and primary break-up under steady pressure conditions», ILASS Europe, 1999
- [2] M. Blessing, G. König, C. Krüger, U. Michels & V. Schwarz, «Analysis of Flow and Cavitation Phenomena in Diesel Injection Nozzles and Its Effects on Spray and Mixture Formation», SAE 2003-01-1358, 2003
- [3] A. Sou, M. I. Maulana, S. Hosokawa, A. Tomiyama «Ligament formation induced by cavitation in a cylindrical nozzle », J. of Fluid science and technology 3 (5), pp.633-644, 2008
- [4] A. Sou, R. H. Pratama, R. Ohashi, R. Sugimura, « Cavitation in a nozzle with asymmetric inflow and its effects on liquid jet », ILASS-Europe 2011.
- [5] Cyril Mauger. « Cavitation dans un micro-canal modèle d'injecteur diesel : méthodes de visualisation et influence de l'état de surface », Thèse de l'Université de Lyon délivrée par l'École Centrale Lyon, Soutenue le 30 mai 2012.
- [6] C. Mauger, L.Méès, S. Valette, M. Michard, « Etude Optique d'un Ecoulement diesel cavitant dans un canal 2D Transparent », 14ème Congrès Français de Visualisation et de Traitement d'Images en Mécanique des Fluides, Lille, 21 – 25 novembre 2011.

Remerciements

Ces travaux sont effectués dans le cadre du programme NADIA_bio, soutenu financièrement par la Direction Générale de la Compétitivité de l'Industrie et des Services, la Région Haute Normandie, le Conseil Général des Yvelines et le Pôle de Compétitivité Mov'eo.