



**HAL**  
open science

# Étude d'un écoulement de canal cavitant par plusieurs techniques optiques

Cyril Mauger, Loic Mees, Stéphane Valette, Marc Michard

► **To cite this version:**

Cyril Mauger, Loic Mees, Stéphane Valette, Marc Michard. Étude d'un écoulement de canal cavitant par plusieurs techniques optiques. 14ème Congrès Français de Visualisation et de Traitement d'Images en Mécanique des Fluides (FLUVISU14), 2011, Lille, France. hal-02151303

**HAL Id: hal-02151303**

**<https://hal.science/hal-02151303>**

Submitted on 27 Nov 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# ETUDE D'UN ECOULEMENT DE CANAL CAVITANT PAR PLUSIEURS TECHNIQUES OPTIQUES

Cyril MAUGER <sup>a,\*</sup>, Loïc MÉÈS <sup>a</sup>, Stéphane VALETTE <sup>b</sup>, Marc MICHARD <sup>a</sup>

<sup>a</sup>Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique (LMFA), CNRS UMR 5509 – Ecole Centrale de Lyon – INSA de Lyon – Université Claude Bernard – Lyon 1, Ecully

<sup>b</sup>Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes (LTDS), CNRS UMR 5513 – Ecole Centrale de Lyon – Ecole Nationale d'Ingénieurs de Saint Etienne

\*Adresse électronique de l'auteur correspondant [cyril.mauger@ec-lyon.fr](mailto:cyril.mauger@ec-lyon.fr)

---

## Résumé

La cavitation joue un rôle important dans les injecteurs automobiles et a fait l'objet de nombreuses études expérimentales. Des modèles numériques existent mais nous manquons de résultats expérimentaux précis et complets pour les faire progresser et les valider. L'objectif de ce travail est de réaliser des observations et des mesures dans un écoulement 2D cavitant, dans des conditions proches de celles de l'injection diesel. Différentes techniques optiques ont été utilisées pour visualiser les poches de cavitation et accéder au champ de pression. La formation et le développement de poches de cavitation sont observés par imagerie en transmission. La technique révèle également la présence de gradients de densité dans l'écoulement, ce qui enrichit les observations mais engendre des difficultés d'interprétation. Un couplage entre imagerie interférométrique et strioscopie permet d'obtenir en complément des champs de densité dans le canal.

**Mots Clés :** Injection diesel / Cavitation / Imagerie en transmission / Interférométrie / Strioscopie

---

## 1. Introduction

Le rôle de l'injecteur dans un moteur thermique est de pulvériser le carburant en fines gouttelettes pour en favoriser l'évaporation et le mélange, avant la combustion. Dans les injecteurs diesel, le carburant est pressurisé et fortement accéléré dans des orifices de petites dimensions. Le fluide à l'intérieur des orifices subit par conséquent de fortes chutes de pression qui conduisent souvent à la cavitation. La cavitation est généralement vue comme un inconvénient : bruit, vibrations, baisse de rendement, détérioration... Dans le cas des injecteurs automobiles, elle cause en effet une diminution conséquente du coefficient de décharge mais elle semble aussi limiter l'encrassement des orifices. Enfin, une cavitation maîtrisée pourrait favoriser les processus d'atomisation et ainsi permettre de concevoir des injecteurs plus efficaces d'un point de vue énergétique et environnemental.

L'étude de Bergwerk [1959] fut l'une des premières à mettre en évidence la formation de cavitation dans les injecteurs et son possible impact sur le jet, en sortie. Des études similaires ont ensuite confirmé ces observations (Nurick [1976], Hiroyasu *et al.* [1991], Soteriou *et al.* [1995] et Tamaki *et al.* [1997]). L'influence de certains paramètres clés a fait l'objet d'études, comme la géométrie de l'orifice (Soteriou *et al.* [1995], Schmidt *et al.* [1997], Winklhofer *et al.* [2003], Payri *et al.* [2005]), l'état de surface (Badock *et al.* [1999]) ou les propriétés du carburant (Suh *et al.* [2008]). Notre connaissance du phénomène de cavitation dans les injecteurs restant toutefois incomplet, des données expérimentales précises et exhaustives sont nécessaires pour faire progresser et valider les modèles numériques qui aident à la conception des nouveaux injecteurs.

L'étude de la cavitation en conditions réelles d'injection est difficile (hautes pressions, vitesses d'écoulement, petites dimensions, pas d'accès optique). Des simplifications sont donc nécessaires. Notre orifice modèle est un canal 2D, transparent, de 400  $\mu\text{m}$  de hauteur. L'écoulement est permanent (pas de levée d'aiguille) et la pression amont est limitée à 60 bar. La vitesse de l'écoulement reste inférieure à 100  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Notre dispositif expérimental s'inspire

des travaux de Roosen [2000] et de Winklhofer *et al.* [2001] mais le canal est ici démontable. Le canal est constitué de deux plaques métalliques placées entre deux hublots (Fig. 1b). La possible dissociation des plaques permet de façonner et de contrôler précisément la géométrie et l'état de surface du canal à l'aide d'un microscope électronique à balayage et d'un profilomètre optique afin de faciliter, dans un futur proche, la confrontation entre expérience et calcul. Le fluide est une huile de calibration (SHELL V-Oel-1404).

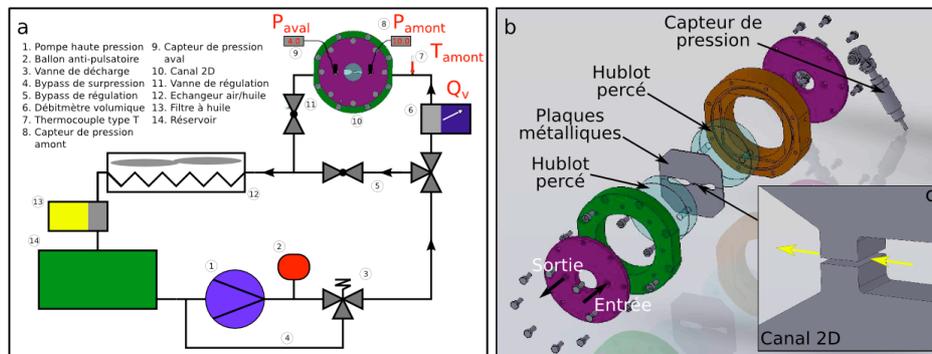


Fig. 1. Dispositif expérimental.

Le canal est schématisé Fig. 2. Le débit augmente avec la différence de pression  $\Delta P = P_A - P_B$ . La pression amont  $P_A$  est maintenue constante à 50 bar,  $P_B$  est variable. Le brusque rétrécissement à l'entrée du canal provoque la formation de zones de recirculation et des couches de fort cisaillement entre ces zones et l'écoulement principal au centre du canal.

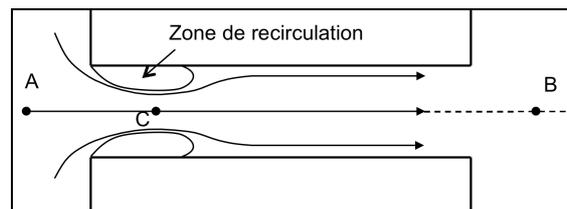


Fig. 2. Représentation schématisée de l'écoulement dans un canal.

## 2. Imagerie en transmission

La formation de la cavitation dans le canal est observée au moyen d'un montage d'imagerie en transmission. Eclairage et dispositif d'imagerie se font face de part et d'autre du canal. Les petites dimensions qui imposent de travailler avec un fort grossissement et la vitesse de l'écoulement ( $\leq 70 \text{ m.s}^{-1}$ ) nécessitent un éclairage très bref, afin de figer l'écoulement. Une source de lumière brève et incohérente est obtenue en focalisant la seconde harmonique d'un laser Nd:YAG pulsé double cavité sur une pastille de PMMA fluorescente. La lumière émise par la pastille est collimatée et la raie laser est filtrée pour éviter le *speckle* sur les images. Cette source lumineuse, d'une durée de 12 ns, présente un spectre d'environ 100 nm de large. Une caméra CCD 4 Mpx double trame et un zoom optique Optem 125C complètent le dispositif. La résolution est de  $1,15 \mu\text{m.px}^{-1}$ . En mode double trame, des couples d'images séparées de 220 ns ou plus peuvent être enregistrés.

Dans les images en transmission de la Fig. 3, les zones liquides sont claires et les zones gazeuses sont sombres, du fait des réflexions (et réfraction) aux interfaces liquide-gaz. Les images portent également la marque des gradients d'indice de réfraction selon le principe de l'ombroscopie (Merzkirch [1974]), sous forme de zones sombres ou brillantes. Ces gradients d'indice correspondent à des gradients de densité, eux-mêmes liés à des gradients de température et/ou de pression. La profondeur de notre canal ( $L=2 \text{ mm}$ ) amplifie l'effet des gradients. Fig. 3a, pour une faible différence de pression, l'écoulement est monophasique mais les forts gradients de densité situés dans les couches de cisaillement apparaissent sous

forme de traits noirs aux contours brillants. La cavitation apparaît pour une différence de pression de 25,7 bar (Fig. 3b). Les poches de cavitation se développent ensuite dans les zones de recirculation (Fig. 3c) et s'allongent (Fig. 3d). Sur les quatre images, on observe des gradients de densité à la sortie du canal. Un gradient thermique dû à l'échauffement du fluide le long des parois est combiné à un gradient de pression. On observe également des structures « turbulentes » dans le sillage des zones de recirculation ou des poches de cavitation. Les gradients d'indice à l'origine de ces structures peuvent être liés à des variations locales de pression caractéristiques de l'écoulement turbulent ou à un marquage thermique de l'écoulement en amont. Dans les deux cas, ces structures semblent indiquer la présence de turbulence ou de fortes instabilités. Enfin, toujours selon le même principe de l'ombroscopie, des ondes de pression sont visibles, quand l'écoulement est cavitant (à l'entrée du canal, Fig. 3c). Nous attribuons ces ondes à l'effondrement de poches de cavitation. Fig. 4, une poche de vapeur s'est détachée. A l'instant  $t+286$  ns, cette poche s'est déplacée de  $16 \mu\text{m}$ . Son volume apparent a nettement diminué suite à une recondensation brutale de la vapeur (effondrement). Une onde de pression circulaire plus marquée que les autres et centrée sur la zone d'effondrement est clairement visible. Ce phénomène a fait l'objet d'une simulation numérique (Sezal *et al* [2009]).

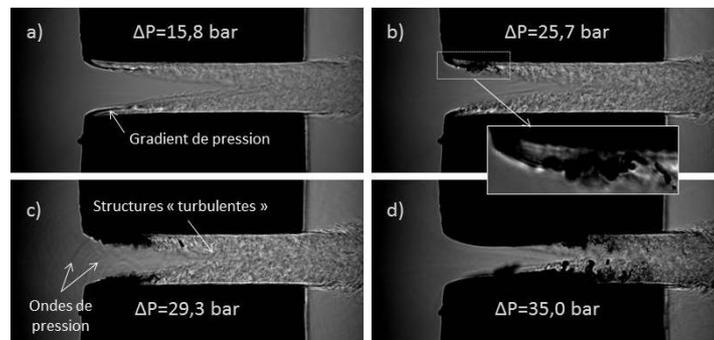


Fig. 3. Images en transmission pour différents régimes d'écoulement.

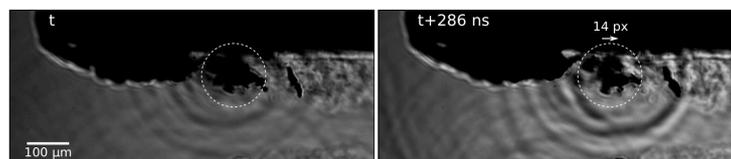


Fig. 4. Effondrement d'une poche de cavitation.

L'effet d'ombroscopie sur les images en transmission est une source d'information supplémentaire, jamais considérée à notre connaissance dans des expériences similaires. Toutefois, cet effet induit aussi une ambiguïté dans l'interprétation des zones sombres des images. Par exemple, il est clair sur l'agrandissement de la Fig. 3c qu'une poche de cavitation se forme dans la couche de cisaillement. La forme et la taille de la structure sombre ainsi que l'absence de contours brillants permettent de l'affirmer sans risque. En revanche, il est plus difficile de statuer sur l'origine de la partie sombre au début de la couche de cisaillement (près du bord vif à l'entrée du canal) ou sur l'éventuelle présence de cavitation dans la couche de cisaillement inférieure (au bas de la même image).

### 3. Imagerie interférométrique

L'imagerie en transmission est sensible au gradient d'indice de réfraction mais la reconstruction d'un champ de densité à partir des images obtenues n'est pas possible. D'abord, l'ombroscopie est sensible à la dérivée seconde de l'indice. La double intégration qui s'impose introduit une grande sensibilité au bruit. Ensuite, les gradients d'indice présents dans notre écoulement sont très importants, conduisant à une saturation rapide de

l'information ainsi qu'au non-respect des hypothèses de base de l'ombroscopie et des formules d'inversion. Enfin, pour visualiser les poches de cavitation, nous faisons la mise au point au centre du canal et non pas dans un plan situé à l'avant de celui-ci comme on le fait en ombroscopie. Pourtant, la pression est le principal paramètre déclencheur de la cavitation ; l'obtention d'un champ de densité dans le canal apparaît essentielle pour la compréhension de ce phénomène et une confrontation entre calcul et expérience.

Pour accéder au champ de pression, nous nous sommes tournés vers un dispositif d'interférométrie de type Mach Zehnder. Un faisceau laser continu est filtré spatialement puis divisé en un faisceau de référence et en un faisceau d'imagerie qui éclaire le canal. Les deux faisceaux sont ensuite recombinaés et produisent des interférences. Pour un écoulement 2D, l'interfrange peut être facilement relié à une variation de densité  $\Delta\rho$  via la relation de Lorentz-Lorenz. La Fig. 5 montre des images interférométriques obtenues dans les mêmes conditions que les images en transmission de la Fig. 3 mais pour un temps d'exposition de 20  $\mu$ s. Les variations de densité sont nettement visibles sous forme de franges à l'entrée du canal, où la pression chute rapidement, et dans les zones de recirculation (Fig. 5a-5b). Il n'y a pas de frange dans les poches de cavitation (Fig. 5c-5d) qui apparaissent en gris et non en noir, car ici, seul le faisceau d'imagerie est éteint.

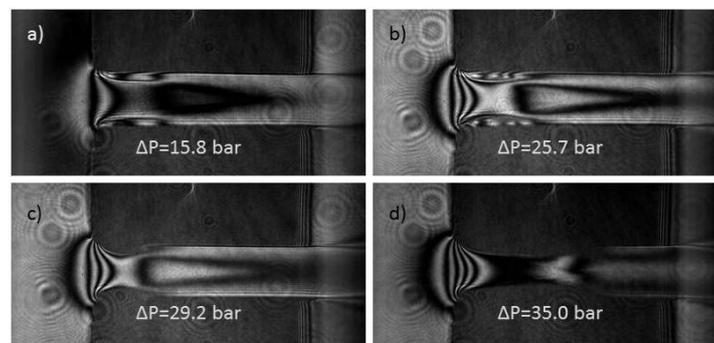


Fig. 5. Images interférométriques réalisées dans les mêmes conditions que la Fig. 3.

Si en principe, les images permettent de reconstruire un champ de densité de proche en proche à partir d'une condition connue, le passage d'une frange sombre à une frange brillante peut être interprété comme une variation de  $\pm\Delta\rho$ . Cette ambiguïté sur le signe peut parfois être levée intuitivement mais il est préférable de pouvoir s'appuyer sur les informations fournies par une autre technique de mesure, comme l'ombroscopie ou la strioscopie.

#### 4. Description qualitative des gradients de masse volumique par strioscopie

Dans nos conditions d'expérience, l'ombroscopie n'a pas permis d'obtenir une mesure de la densité, ni même de tendances fiables sur l'évolution de cette dernière dans le canal. Nous avons donc mis en place un montage strioscopique (Schlieren). Cette technique est sensible à la dérivée première de l'indice de réfraction (Smits et Lim [2000]) et elle n'est pas incompatible avec une mise au point au centre du canal.

Un schéma du montage est présenté Fig. 6. Éclairage et optique de collection se font face de part et d'autre du canal. Une première lentille permet de matérialiser un plan de Fourier dans lequel on place un couteau. Une seconde lentille permet de reformer une image du canal. La divergence du faisceau d'éclairage étant non nulle, chaque rayon lumineux est associé à une tache lumineuse de surface  $a$  dans le plan de Fourier. En l'absence de gradient d'indice, la tache est sur l'axe optique et partiellement coupée par le couteau. En présence d'un gradient (vertical par exemple), le rayon est dévié et la tache se déplace dans le plan de Fourier, vers le haut ou vers le bas selon le signe du gradient. Le couteau laisse alors passer plus ou moins de lumière et l'image du gradient apparaît plus lumineuse ou plus sombre. La variation

d'intensité locale  $\Delta I$  dans l'image (par rapport à l'intensité non perturbée  $I$ ) est reliée au gradient d'indice par :

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{Lf}{a} \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial y}$$

où  $f$  est la focale de la première lentille. En principe, le champ de densité peut être reconstruit par intégration à partir des images de strioscopie. En pratique, cette intégration ne permet pas d'obtenir des informations quantitatives en raison de l'importance du bruit et de l'absence de calibration. Il est cependant possible de réaliser l'intégration et d'en extraire des tendances sur lesquelles nous nous appuyerons pour reconstruire les champs de densité à partir des images interférométriques.

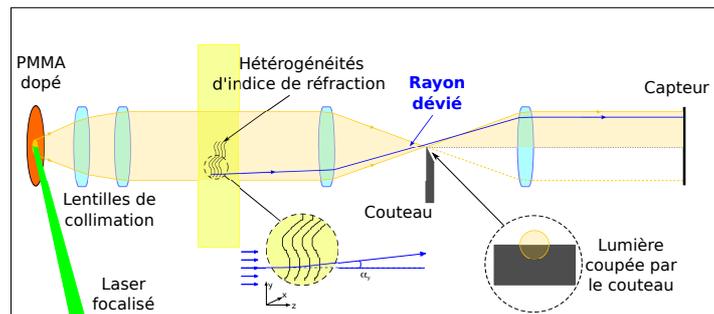


Fig. 6. Montage optique pour la visualisation en strioscopie de l'écoulement.

Le couteau est d'abord positionné verticalement pour mettre en évidence les gradients dans le sens de l'écoulement. La Fig. 7 montre des images de strioscopie pour des conditions d'écoulement cavitant et non cavitant, ainsi que les profils d'intensité selon l'axe central (en vert) et leur intégration numérique (en rouge). On constate que la densité décroît avec la pression à l'entrée du canal, jusqu'au point de plus fort rétrécissement. Elle augmente ensuite légèrement quand l'écoulement principal réoccupe l'ensemble du canal, juste après les zones de recirculation (ou poches de cavitation), puis diminue de nouveau. Dans la seconde moitié du canal, il n'est plus possible de dégager une tendance fiable en raison des oscillations rapides du profil d'intensité.

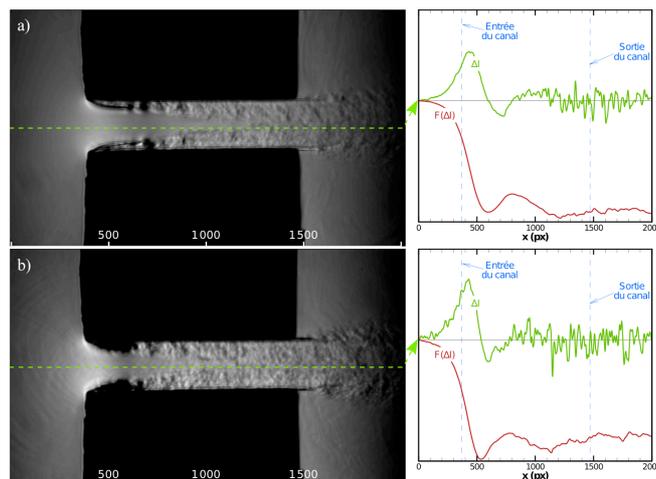


Fig. 7. Images strioscopiques (couteau en position horizontale), profil d'intensité (en vert) et intégration (en rouge) pour a)  $\Delta P=15,7$  bar et b)  $\Delta P=29,0$  bar.

Fig. 8, le couteau est positionné horizontalement de manière à visualiser les gradients verticaux de densité. A l'entrée du canal, un gradient apparaît sous forme de trait sombre dans la couche de cisaillement du haut. Le gradient de signe opposé se traduit par un trait brillant

dans la couche du bas. A mesure que  $\Delta P$  et le débit augmentent, les gradients sont plus intenses ; le trait sombre s'assombrit (Fig. 8a-8c) et le trait lumineux s'éclaircit (Fig. 8a-8b). La Fig. 8c fait exception puisqu'elle montre un assombrissement au cœur du trait lumineux, qui s'épaissit pour les différences de pression plus élevées (non représentées). Deux hypothèses peuvent être avancées pour expliquer ce phénomène. La première consiste à supposer un changement de phase (cavitation), mais la différence de pression n'est ici que de 24,6 bar alors que le déclenchement de la cavitation se produit pour  $\Delta P \approx 25,7$  bar d'après l'imagerie en transmission. L'assombrissement peut également être dû à de très forts gradients. La déviation des rayons lumineux deviendrait alors telle qu'ils sortiraient de l'angle de collection. Quoi qu'il en soit, cet assombrissement correspond à une perte locale d'information sur le gradient d'indice dont il faut tenir compte.

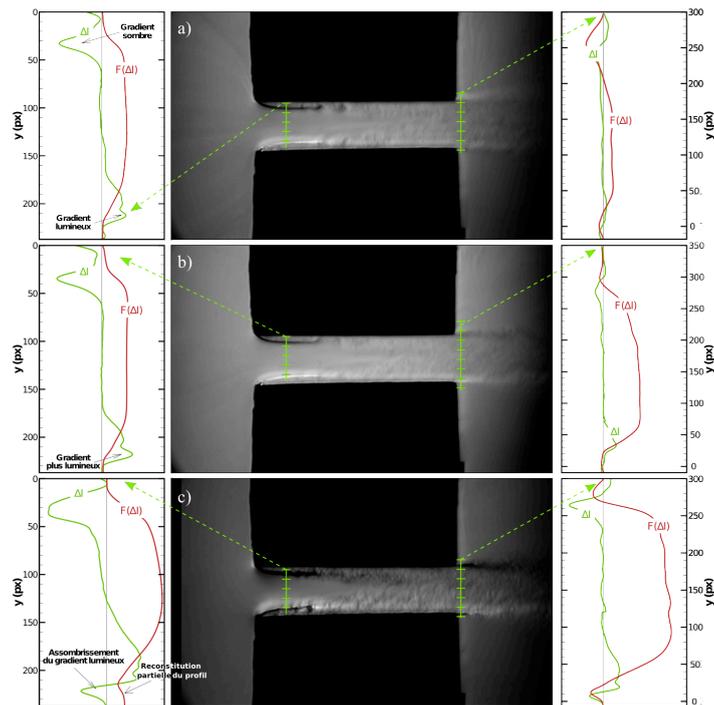


Fig. 8. Images strioscopiques (couteau en position verticale), profil d'intensité (en vert) et intégration (en rouge) pour a) :  $\Delta P=7,8$  bar, b)  $\Delta P=9,8$  bar et c)  $\Delta P=24,6$  bar.

On peut tout de même tirer des enseignements de ces résultats de strioscopie. En partant du centre de l'écoulement, les profils intégrés montrent une diminution de la masse volumique à mesure que l'on se rapproche de la paroi. Pour la reconstruction des champs de densité, les franges d'interférence seront donc interprétées (quand elles seront visibles) comme une diminution de la densité dans cette direction. La Fig. 8 montre également les profils d'intensité et les profils intégrés à la sortie du canal. Des gradients d'indice sont présents à la limite du jet sortant. Ils s'intensifient lorsque le débit augmente (Fig. 8a-8c). La masse volumique reste à peu près constante au centre du jet. Elle décroît à sa périphérie sous l'effet combiné de la chute de pression (vers l'équilibre avec la pression de l'enceinte) et de l'augmentation de température due à l'échauffement visqueux du fluide au niveau de la paroi. Ces courbes de tendance nous montrent que la densité réaugmente ensuite légèrement jusqu'à l'équilibre thermique avec l'enceinte. Sur les images interférométriques, les sauts de phase seront donc interprétés comme une diminution de densité du centre du jet jusqu'au centre de la couche de mélange périphérique puis comme une augmentation au-delà.

## 5. Reconstruction du champ de masse volumique

Les champs de masse volumique de la Fig. 5 ont été reconstruits en s'appuyant sur les résultats de la strioscopie. La reconstruction se fait de proche en proche, en partant de la condition de densité amont connue (pression et température). Au centre du canal, la reconstruction est relativement aisée, suivant le trajet (1) de la Fig. 9 et en respectant la cohérence du champ reconstruit dans les deux dimensions (trajet (1')). La reconstruction est plus difficile dans les zones de recirculation. Pour les faibles débits, la reconstruction se fait selon le trajet (2) de la Fig. 9 mais pour des débits plus importants, les gradients d'indice s'amplifient dans les couches de cisaillement. Les franges ne sont d'abord plus clairement séparées, puis des zones sombres y apparaissent, selon le même principe que l'ombroscopie. La reconstruction du champ de densité se fait alors selon le trajet (3), en remontant de l'arrière de la zone de recirculation, à partir de l'écoulement principal. Dans les poches de cavitation, la reconstruction n'est pas possible en l'absence de frange (zones grises).

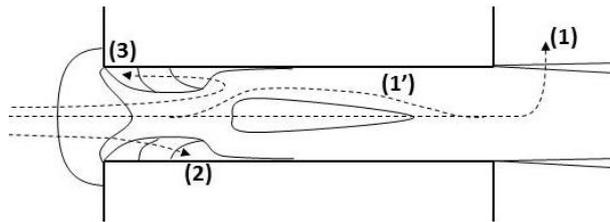


Fig. 9. Schéma de principe de la reconstruction des champs de densité.

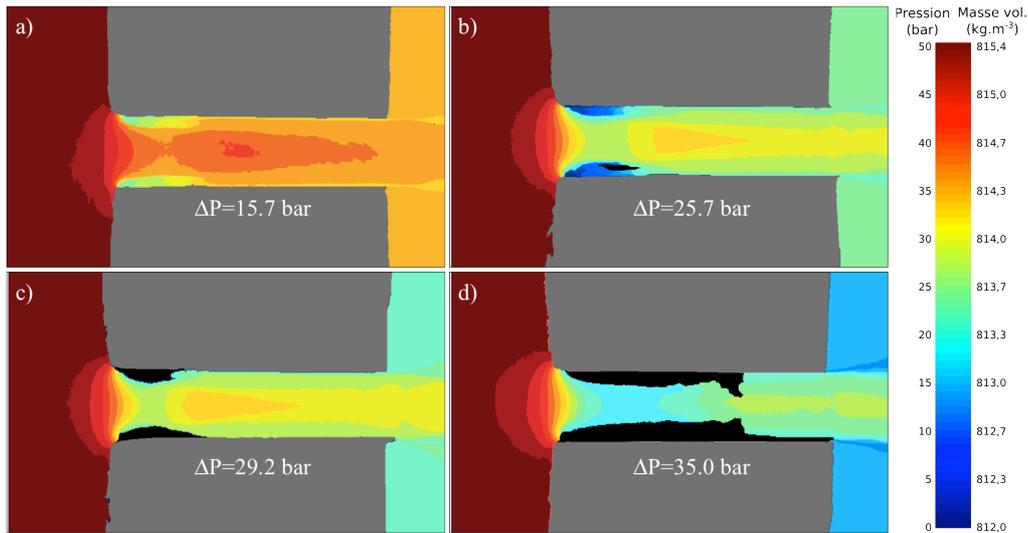


Fig. 10. Reconstruction des champs de masse volumique et de pression.

La Fig. 10 montre le champ de densité reconstruit pour un débit croissant ( $\Delta P$  croissant). En supposant une température homogène, nous avons traduit les densités en pression à partir de mesures réalisées par le Laboratoire des Fluides Complexes-Réservoir (LFC, UMR TOTAL CNRS 5150 et Université de Pau et des Pays de l'Adour). Sur les images interférométriques, un demi-interfrange correspond à  $\delta P=3,5$  bar. Les champs de pression sont à considérer avec prudence, en particulier à la sortie du canal où les effets thermiques sont importants. La Fig. 10 montre que jusqu'à l'apparition de la cavitation, les zones de plus basses pressions sont situées dans les zones de recirculation, au plus près de l'angle vif à l'entrée du canal (Fig. 10a-10b), alors que la cavitation semble se déclencher plus loin dans la couche de cisaillement (Fig. 3b). Ces observations suggèrent un rôle non négligeable du cisaillement dans le déclenchement de la cavitation, comme le propose Joseph [1998]. Par ailleurs, les champs confirment l'importance du saut de pression à la traversée des couches de cisaillement. On évalue l'angle de déviation dû au gradient d'indice correspondant aux

conditions de la Fig. 8c à environ  $7^\circ$  pour un demi-angle de collection de  $5,7^\circ$ . Le trait noir de la Fig. 8c est donc probablement dû au dépassement de l'angle de collection et non à la présence de vapeur. Au centre du canal, le point de plus basse pression est situé au point de plus fort rétrécissement. Jusqu'à la formation de poches de cavitation (Fig. 10a-10c) ce point se rapproche de l'entrée du canal. Il s'en éloigne ensuite à mesure que les poches de cavitation s'étirent vers la sortie, à des débits plus importants (Fig. 10d). La pression retrouvée dans l'enceinte de décharge correspond bien dans tous les cas à la pression aval fixée, à  $\delta P$  près.

## 6. Conclusion

Nous avons utilisé différentes techniques d'imagerie pour visualiser la cavitation et mesurer les champs de pression dans un orifice de décharge 2D dans des conditions proche des injecteurs diesel. L'influence des gradients d'indice sur les images en transmission permet de visualiser en plus des poches de cavitation, les gradients de pression ou de température, des ondes de pression, ou de détecter la présence de turbulence. En revanche, elle rend plus difficile l'interprétation des images. La reconstruction des champs de densité proposée s'appuie sur un couplage entre strioscopie et interférométrie. Ce travail a été soutenu par le Fond Unique Interministériel à travers le programme NADIA\_bio qui regroupe industriels et universitaires français autour de la problématique de l'injection diesel.

## Références

- Badock C., Wirth R., Tropea C., [1999] *The influence of hydro-grinding on cavitation inside a diesel injection nozzle and primary break-up under steady pressure conditions*, ILASS Europe.
- Bergwerk W., [1959] *Flow pattern in diesel nozzle spray holes*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 173, p. 655-660.
- Hiroyasu H., Arai M., Shimizu M., [1991] *Breakup length of a liquid jet and internal flow in a nozzle*, Proceedings of ICLASS 91, p. 123-133
- Joseph D. D., [1998] *Cavitation and the state of stress in a flowing liquid*, J. Fluid. Mech, Vol 366, p367-378.
- Nurick W. H., [1976] *Orifice cavitation and its effects on spray mixing*, Journal of Fluids Engineering, Vol. 98, p. 681-687.
- Payri R., Garcia J. M., Salvador F. J., Gimeno J., [2005] *Using spray momentum flux measurements to understand the influence of diesel nozzle geometry on spray characteristics*, Fuel, Vol. 84, p. 551-561.
- Roosen P., [2000] *Investigation of the Transient Behaviour of Cavitation Effects in Liquid Injection Nozzles*, Transient Phenomena in Multiphase and Multicomponent Systems, Deutsche Forschungsgemeinschaft.
- Schmidt D. P., Rutland C. J., Corradini M. L., [1997] *A Numerical Study of Cavitating Flow Through Various Nozzle Shapes*, SAE Transactions, Journal of Engines, Vol. 106, Sec. 3, p. 1644-1673.
- Sezal I. H., Schmidt S. J., Schnerr G. H., Thalhamer M. and Förster M. [2009] *Shock and wave dynamics in cavitating compressible liquid flows in injection nozzles*, Shock Waves, vol. 19, p. 49-58.
- Smits A. J., Lim T. T., [2000] *Flow visualization, Techniques and examples*, Imperial College Press.
- Soteriou C., Andrews R., Smith M., [1995] *Direct Injection Diesel Sprays and the Effect of Cavitation and Hydraulic Flip on Atomization*, SAE.
- Suh H. K., Park S. H., Lee C. S., [2008] *Experimental Investigation of Nozzle Cavitating Flow Characteristics for Diesel and Biodiesel Fuels*, International Journal of Automotive Technology, Vol. 9, p. 217-224.
- Tamaki N., Nishida K., Hiroyasu H., Shimizu M., [1997] *Effects of the Internal Flow in a Nozzle Hole on the Breakup Process of a Liquid jet*, Proceedings of ICLASS 97, p. 417-424.
- Winklhofer E., Kull E., Kelz E., Morozov A. [2001] *Comprehensive hydraulic and flow field documentation in model throttle experiments under cavitation conditions*, ILASS Europe.
- Winklhofer E., Kelz E., Morozov A., [2003] *Basic flow processes in high pressure fuel injection equipment*, ILASS Europe.