

# ANALYSE DE SIGNAUX VLC D'UN JET DENSE : RECONSTRUCTION PAR IMAGERIE RAPIDE

**Thomas LACROIX<sup>1</sup>\*, Claude ROZE, Jean-Bernard BLAISOT**

UMR 6614 – CORIA, CNRS, Université et INSA de Rouen, Saint Etienne du Rouvray

\*Auteur correspondant : [thomas.lacroix@coria.fr](mailto:thomas.lacroix@coria.fr)

## 1. Introduction

Dans les applications d'injection directe, le jet liquide sortant de l'orifice est optiquement très dense et de vitesse élevée. La vitesse est une donnée d'entrée nécessaire pour les modèles numériques d'atomisation. Elle n'est cependant pas facile à mesurer. Les conditions optiques rendent difficiles les mesures pour les techniques telles que la PIV (alors incapable de suivre les gouttelettes dans le spray) ou encore par ADL (dû à la diversité des formes des éléments liquides rencontrés). Des études en cours permettent d'établir numériquement les conditions initiales d'atomisation pour les sprays diesels (Yon et al. 2002, Idlhacen et al. 2009, Hespel et al. 2012).

La Vélocimétrie Laser par Corrélation (VLC) développée par Chaves et al. en 1993, représente une solution facile à mettre en œuvre pour obtenir des informations sur la vitesse axiale de l'écoulement dans la phase liquide dense de la proche sortie d'injecteur. En effet, à la différence de l'ADL ou de la PIV, cette technique ne nécessite de faire aucune hypothèse sur la forme des éléments liquides rencontrés et fonctionne même dans les zones denses. Elle consiste à éclairer le jet et à former l'image de deux éléments de volume du spray sur deux détecteurs. L'intensité lumineuse reçue fluctue alors dans le temps en fonction de la densité du spray et de la taille des structures liquides. Si les deux volumes de mesures ne sont pas trop éloignés l'un de l'autre, ces deux signaux sont corrélés dans le temps. Toute structure liquide traversant le premier volume de mesure a une forte probabilité de traverser également le second situé en aval. Nous obtenons un décalage temporel  $\Delta t$  entre nos deux signaux, qui correspond au temps de vol des structures liquides entre les deux volumes de mesure. La vitesse est alors déduite par le rapport de la distance entre les deux volumes de mesure sur le décalage temporel obtenu.

Les avantages de cette technique sont multiples : faible coût de mise en œuvre, technique non intrusive, et peu sensible à la forme de l'objet. En revanche, malgré la simplicité du montage, la relation entre la vitesse mesurée par la VLC et la vitesse hydrodynamique du jet n'est pas évidente, en particulier lorsque la technique est utilisée en très proche sortie d'injecteur, là où le liquide n'est pas encore dispersé en gouttelettes. L'objectif de cette étude est d'améliorer l'interprétation des signaux issus de la technique VLC. Une première étude a consisté à réaliser un montage d'imagerie utilisant une source laser femtoseconde et une caméra haute définition à 50Hz de façon à localiser spatialement les volumes de mesures pris en compte par la VLC (Lacroix et al. 2012).

Afin de mener cette comparaison dans le domaine temporel, un nouveau montage est proposé, en couplant la technique VLC à une technique d'imagerie rapide, utilisant une caméra ultra-rapide Phantom V12 associée à une source blanche de forte puissance. La fréquence d'acquisition choisie permet de suivre temporellement sur les images le

---

<sup>1</sup> Correspondant : [lacroix@coria.fr](mailto:lacroix@coria.fr)

pourcentage de liquide et de gaz au sein des volumes de mesures. Le but est alors de le comparer avec le signal VLC enregistré aux mêmes instants.

Dans une première partie, nous ferons un rapide descriptif de l'étude expérimentale. La mise en place des volumes de mesure sur les images sera présentée dans une seconde partie. Des premiers résultats présentant des acquisitions simultanées de signaux VLC et d'images réalisées par la caméra rapide seront ensuite présentés. L'hypothèse faite sur ces résultats porte sur la concordance entre le signal VLC et le signal reconstruit par les images rapides. Les premiers résultats montrent la similitude entre les deux signaux, et par conséquent la possibilité de caractériser la nature de l'écoulement à partir de l'analyse du signal VLC. Quelques perspectives pour ce travail sont formulées pour conclure.

## 2. Etude expérimentale

Un schéma de principe de la VLC est présenté sur la figure 1 : le faisceau d'un laser He-Ne éclaire le spray. Un système optique composé de deux lentilles permet de former l'image de deux volumes de mesure sur deux détecteurs (des fibres optiques dans ce cas). L'espacement vertical  $\Delta x$  de ces volumes de mesures dans le jet, est déterminé par la distance relative  $\Delta f$  entre les deux fibres optiques dans le plan image et par le grandissement du système d'imagerie. De même, le diamètre d'un volume de mesure est proportionnel au diamètre des fibres optiques utilisées et au grandissement du montage. Chacun des volumes de mesure a approximativement la forme d'un cylindre dont l'axe est parallèle à l'axe optique du montage. La longueur du cylindre correspond à la profondeur de champ du système d'imagerie.

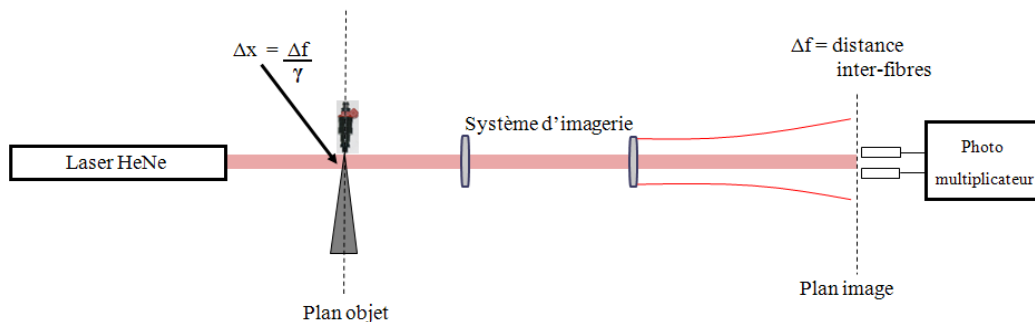


Fig.1 : Schéma de principe du montage VLC.

Une structure liquide passant dans un des volumes de mesure va perturber la quantité de lumière transmise à travers le spray, induisant des fluctuations lumineuses sur la première fibre. Ces fluctuations vont se retrouver sur la seconde fibre, avec un décalage temporel, correspondant au temps de vol des structures liquides entre les deux volumes de mesure. Le temps de vol entre ces deux volumes de mesure est alors déterminé par la corrélation des signaux optiques enregistrés par les deux photomultiplicateurs placés aux extrémités des deux fibres.

### 2.1. Montage hydraulique

L'injecteur utilisé dans le cadre de cette étude est un injecteur direct essence ayant 3 trous alignés. En plus de pouvoir travailler dans une large gamme de pression, il fonctionne avec de l'eau. L'eau est mise sous pression par l'intermédiaire d'une pompe hydraulique Maximator, dotée d'un accumulateur HydroLeduc, permettant une montée en pression jusqu'à 150 bars. Aucune contre pression n'est utilisée.

## 2.2. Montage expérimental pour l'utilisation simultanée de la VLC et de l'imagerie rapide.

Afin de faire des mesures de vitesse par VLC simultanément à l'acquisition d'images, on utilise le montage présenté sur la figure 2, inspiré de celui utilisé dans Lacroix et al. 2012. Le laser HeNe (1) de 30 mW dont le faisceau est de 2 mm de diamètre, éclaire le spray (4). Deux lentilles de focales 170 mm (2a) et 40 mm (2b) permettent un grandissement  $\gamma_1 = 20$ . Deux fibres (3) juxtaposées verticalement, chacune d'un diamètre de 1 mm, collectent la lumière transmise par le spray et la dirigent vers deux photomultiplicateurs (PM), fournissant une tension proportionnelle à l'intensité lumineuse reçue. La distance entre les centres des deux fibres, correspond, compte tenu du grandissement du système optique (2a, 2b), à deux points espacés de 50  $\mu\text{m}$  dans le plan du spray (4). Le tout est ainsi aligné sur le même axe optique. Une station d'acquisition permet d'enregistrer ces signaux jusqu'à une cadence de 50 Mhz.

Un second trajet optique se superpose permettant la visualisation rapide du spray : une source blanche au xénon de marque Lot Oriel, de forte puissance collimatée dont le spectre s'étend du domaine visible à l'UV (5) éclaire le spray à travers un miroir dichroïque réfléchissant toutes longueurs d'ondes inférieures à 567 nm. Après avoir traversé le spray, ce faisceau est dirigé vers la caméra rapide Phantom V12 (6), par un second miroir dichroïque. Un jeu de bagues allonges (7) permet de faire varier le grandissement de l'image collectée sur le capteur CCD de la caméra rapide. Une cadence de 250 000 images par seconde est utilisée, correspondant à une résolution d'image de 128 x 64 pixels. La durée d'exposition de chaque image est de 0.3  $\mu\text{s}$ . Le grandissement obtenu par les bagues allonges (7) est de  $\gamma_2 = 1.44$ , mesuré à l'aide d'une mire. Le champ observé dans la plus grande longueur est donc de 700  $\mu\text{m}$ .

Un générateur de délais (Stanford DG-535) fournit les signaux TTL permettant de commander la levée d'aiguille de l'injecteur et la durée d'injection. Il génère le trigger gérant la carte de conversion analogique/digitale qui assure l'enregistrement des signaux provenant des fibres optiques et collectés par les PM. L'ensemble est synchronisé sur la caméra, qui fonctionne sur son horloge interne.

La cadence d'acquisition des signaux VLC est ajustée à 1 MHz, c'est-à-dire exactement 4 fois plus élevée que la fréquence d'acquisition des images, mais l'enregistrement se fait toutes les 4  $\mu\text{s}$ , de façon à être synchronisé avec la fréquence d'acquisition des images.

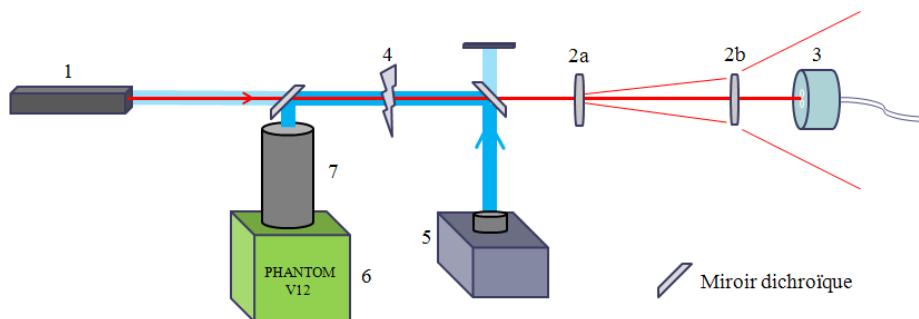


Fig.2 : Schéma de principe du couplage entre les deux montages optiques.

## 3. Traitement des acquisitions.

### 3.1. Caractéristiques des signaux VLC

Les détecteurs reçoivent l'intensité lumineuse provenant du laser, avec les fluctuations dues au passage des structures liquides. Si les détecteurs sont suffisamment rapprochés, les deux signaux reçus seront alors presque identiques, mais

présenteront un décalage temporel, permettant de remonter au temps de vol mis par les structures pour passer du premier au deuxième volume de mesure. La forme de ces signaux dépend fortement de la localisation des volumes de mesure dans le spray. Ainsi, la figure 3a présente un des deux signaux reçus lorsque le volume de mesure est placé au centre du jet, tandis que la 3b montre la perception du signal lorsque le volume est en périphérie du jet. Les mesures sont faites pour une pression d'injection de 2 bar. L'intensité lumineuse reçue, convertie en tension par le PM, varie de 450 mV à des valeurs inférieures à 100mV lorsque le laser est occulté par du liquide. En comparant les figures 3a et 3b, on constate que le signal enregistré au cours du temps est fortement lié à la nature de l'écoulement mesuré : pour la figure (a) l'écoulement est optiquement dense, tandis qu'il est moins dense et présente une succession de portions liquides et gazeuses pour la figure (b).

La mesure du décalage temporel se fait par le calcul de la corrélation entre les signaux recueillis sur les deux fibres. On devine d'après les figures 3a et 3b qu'en fonction du niveau de signal, la mesure ne se fera pas sur les mêmes types de structures liquides : sans doute, sur un front de liquide dans le cas 3a et plutôt sur des gouttelettes ou ligaments dans le cas 3b. La question se pose donc de savoir si on peut directement relier le niveau du signal avec la quantité de liquide présente dans le volume de mesure.

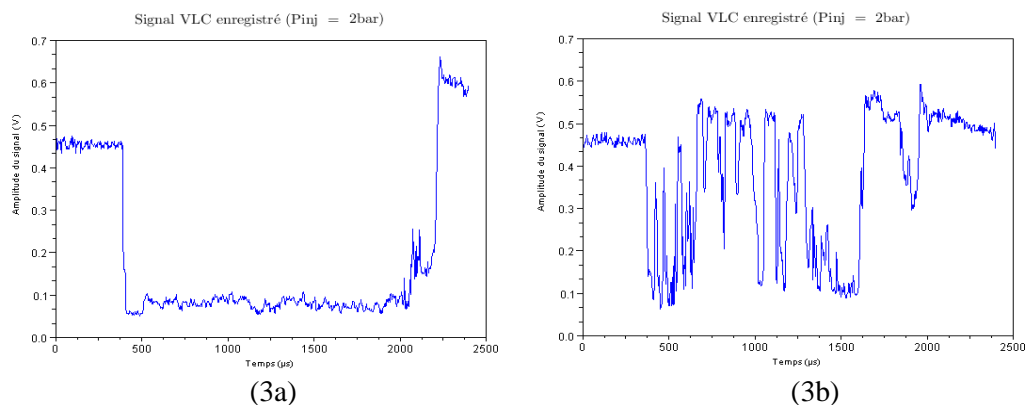


Fig. 3 : Amplitude du signal enregistré au cours du temps lorsque la mesure se fait au centre du jet (a), ou en périphérie du jet (b).

### 3.2. Mesure du volume de mesure

Si on veut comparer les images issues de la caméra avec les signaux VLC, il est nécessaire de déterminer sur ces images la position des volumes de mesure de la technique VLC. Pour cela, on translate un objet de référence dans le plan objet horizontalement et verticalement, et on note les positions pour lesquelles le signal VLC « voit » cet objet. Pour vérification, la taille des volumes de mesure est ensuite mesurée à l'aide d'une mire (fig. 4). Les volumes de mesure seront représentés par deux cercles sur les images présentées.

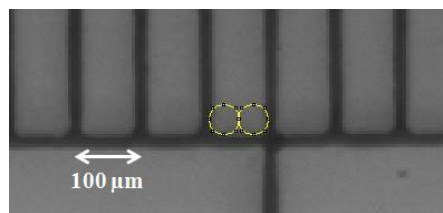


Fig. 4 : Localisation des volumes de mesure sur l'image de la caméra rapide.

### 3.3. Evaluation de la quantité de liquide

Les images prises par la caméra rapide sont en niveaux de gris. On admet qu'il existe un seuil au-delà duquel le niveau de gris représente du gaz et en deçà duquel il représente du liquide. La binarisation des images permet donc d'évaluer le pourcentage

de liquide vue par la technique de VLC. La fréquence d'acquisition choisie, suffisamment rapide, permet le suivi temporel du pourcentage de liquide et de gaz au sein des volumes de mesure.

La valeur du seuil de binarisation est un paramètre fondamental, il est déterminé comme suit : le pourcentage de pixels noirs est tracé en fonction du seuil sur un ensemble d'images : la figure 5 donne un exemple de courbe obtenue pour une seule image. On s'aperçoit qu'il existe un seuil pour lequel ce pourcentage varie peu. La valeur choisie est alors celle pour laquelle la pente de la courbe est minimum. Un exemple de binarisation est donné sur la figure 6.

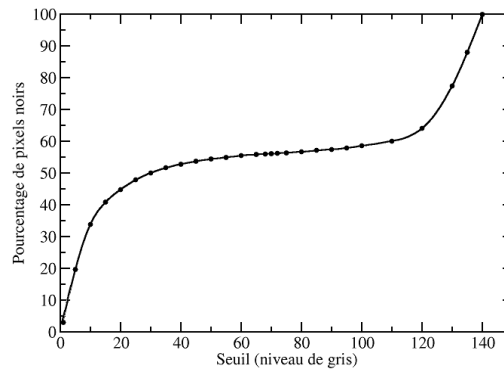


Fig. 5 : Variation du pourcentage de pixels noirs sur une image en fonction de seuil choisi.

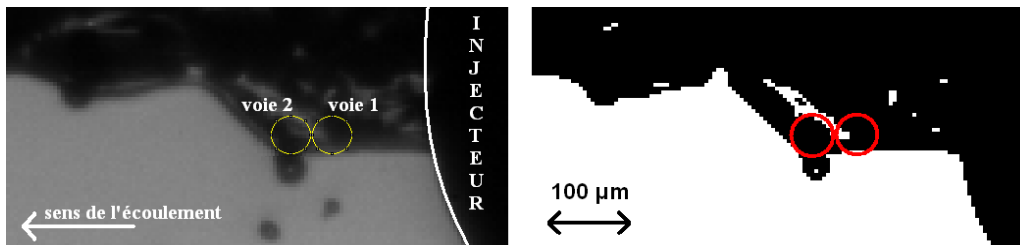
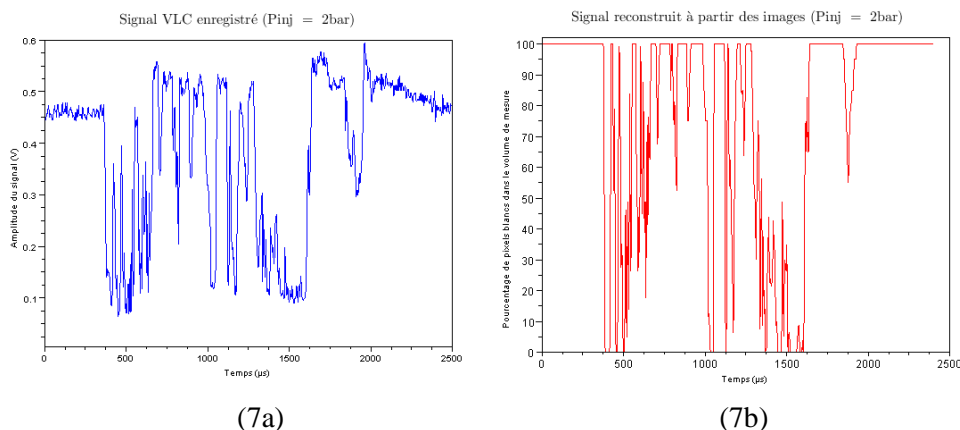


Fig. 6 : Visualisation simultanée du spray et des volumes de mesure utilisés par la VLC. Image originale à gauche, et binarisée à droite.

Une image est enregistrée toutes les 4  $\mu\text{s}$  par la caméra rapide. La succession des images nous permet d'avoir l'histoire du spray dans le temps. Après binarisation, la proportion de pixels blancs présents dans chacun des volumes de mesure est calculée sur chacune des images enregistrées au cours d'une injection. Ce pourcentage est présenté sur la figure 7b et comparé au signal VLC de même fréquence d'échantillonnage, qui est enregistré simultanément pour cette même injection (figure 7a).



(7a) (7b)  
Fig. 7 : Comparaison entre les signaux VLC (7a) et le signal reconstruit à partir des images, obtenu par caméra rapide (7b).

On peut tracer le signal VLC en fonction du signal reconstruit à partir des images (figure 8). On remarque que le niveau moyen du signal VLC augmente de façon proportionnelle par rapport au pourcentage de fraction gazeuse (pixels blancs) mesuré sur les images. Ainsi, la valeur du signal VLC varie entre approximativement 0.040 V (phase 100% liquide) et 0.450 V (phase 100% gazeuse) de façon à peu près linéaire. A partir de ces valeurs extrêmes, on peut déduire un seuil de 0.210 V sur le signal VLC, correspondant à 50% de liquide. Sur la figure, la régression linéaire est calculée sur la zone de 20 % à 90 % de pixels blancs. En effet, en dessous de 20 % et au dessus de 90 %, le signal VLC ne suit pas une relation du même type : alors que la variation de l'amplitude du signal varie peu pour des pourcentages compris de 0 à 20% de pixels blancs sur les images, au contraire, cette amplitude peut varier de façon beaucoup plus aléatoire des pourcentages de 90 ou 100 % de pixels blancs sur les images.

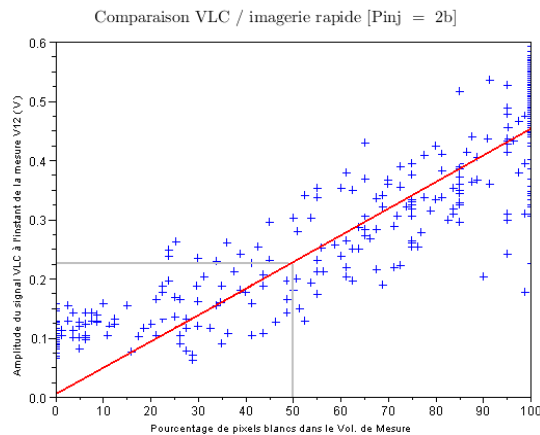


Fig. 8 : Détermination du seuil par comparaison entre les images et le signal brut VLC.

Afin d'évaluer la concordance entre les deux techniques de mesure, nous nous intéressons à une étude sur un intervalle de temps défini. En effet, l'amplitude du signal VLC et le pourcentage de pixels blancs sur les images, dépendent des propriétés physiques du spray traversant le volume de mesure.

Nous déterminons sur le signal VLC sur une fenêtre temporelle dont la largeur est choisie à  $\Delta t = 500\mu s$ . Connaissant la fréquence d'échantillonnage, et donc le nombre de points présents dans cette fenêtre temporelle, nous pouvons évaluer le pourcentage de ceux supérieurs au seuil de 0.210 V. En parallèle, sur la technique d'imagerie rapide, nous déterminons le pourcentage de pixels blancs dans le volume de mesure, que nous moyennons sur l'ensemble des images enregistrées pendant ce même intervalle de temps  $\Delta t$ .

Différentes pressions sont analysées selon cette méthode, pour deux positions de mesure : au centre du spray, et à sa périphérie. L'étude est répétée sur plusieurs acquisitions, afin d'obtenir des valeurs moyennes pour chaque pression.

Au centre du spray, le signal est relativement faible. Comme nous pouvons le voir sur la figure 9a, le pourcentage de points au-delà du seuil sur la technique VLC (courbe bleue) est décroissant avec l'augmentation de la pression d'injection. De même, sur les images rapides (courbe rouge), le volume de mesure est occulté dans son intégralité par la fraction liquide du jet, amenant à un pourcentage nul des pixels blancs avec l'augmentation de la pression d'injection.

La figure 9b traite des résultats selon les mêmes pressions d'injection, le volume de mesure étant maintenant placé en périphérie du spray. Nous observons sur cette figure les similarités entre les deux techniques (courbes bleu et rouge). Nous constatons également qu'une légère modification des paramètres peut biaiser les résultats des mesures : en effet, en choisissant un seuil légèrement supérieur (ici à 0.260 V pour la

courbe bleu ciel) le pourcentage de points VLC supérieurs à ce seuil croît moins vite, avec l'augmentation de la pression d'injection. De même, l'augmentation de la taille du volume de mesure sur la technique d'imagerie (ici passé à 10 pixels de diamètre, pour la courbe rose) a pour conséquence d'augmenter le pourcentage de pixels blancs enregistrés par la technique d'imagerie rapide.

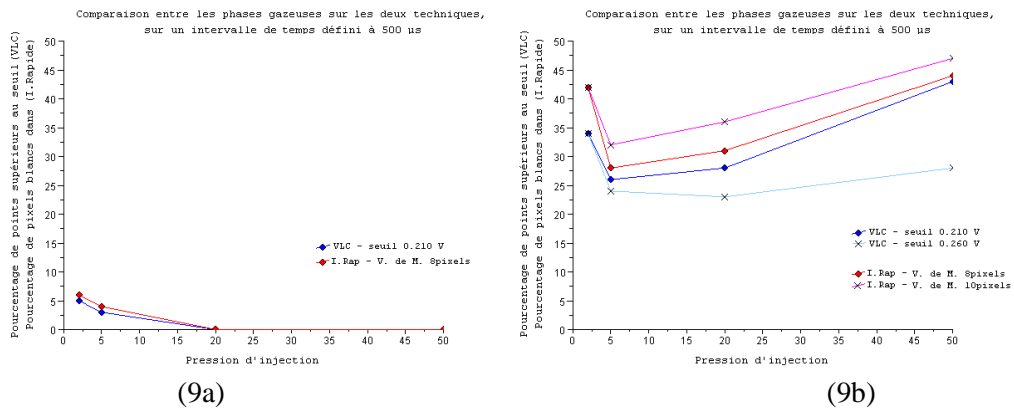


Fig. 9 : Comparaison des pourcentages de pixels blancs (phase gazeuse) enregistrés par les deux techniques, selon une mesure au centre du spray (9a) ou à sa périphérie (9b).

Sur le cas des études faites en périphérie du spray, une analyse des signaux VLC et des images, montre un élargissement du spray lors de l'augmentation de la pression de 2 bar à 5 bar (comparaison entre les figures 10a et 10b). Ceci explique l'occultation des volumes de mesures, et par conséquent la diminution de la fraction gazeuse sur les courbes 9b. Lorsque la pression continue d'augmenter, le spray s'atomisera plus rapidement, amenant à la formation de poches gazeuses, ou de trous dans le spray à hauteur du volume de mesure. Comme nous le remarquons sur l'image 10c, lors du traitement des signaux, un nombre plus important de points dépasse le seuil de 0.210 V, et sur les images, le pourcentage de pixels blanc sera supérieur au cas d'une plus basse pression, où le jet n'est pas atomisé.

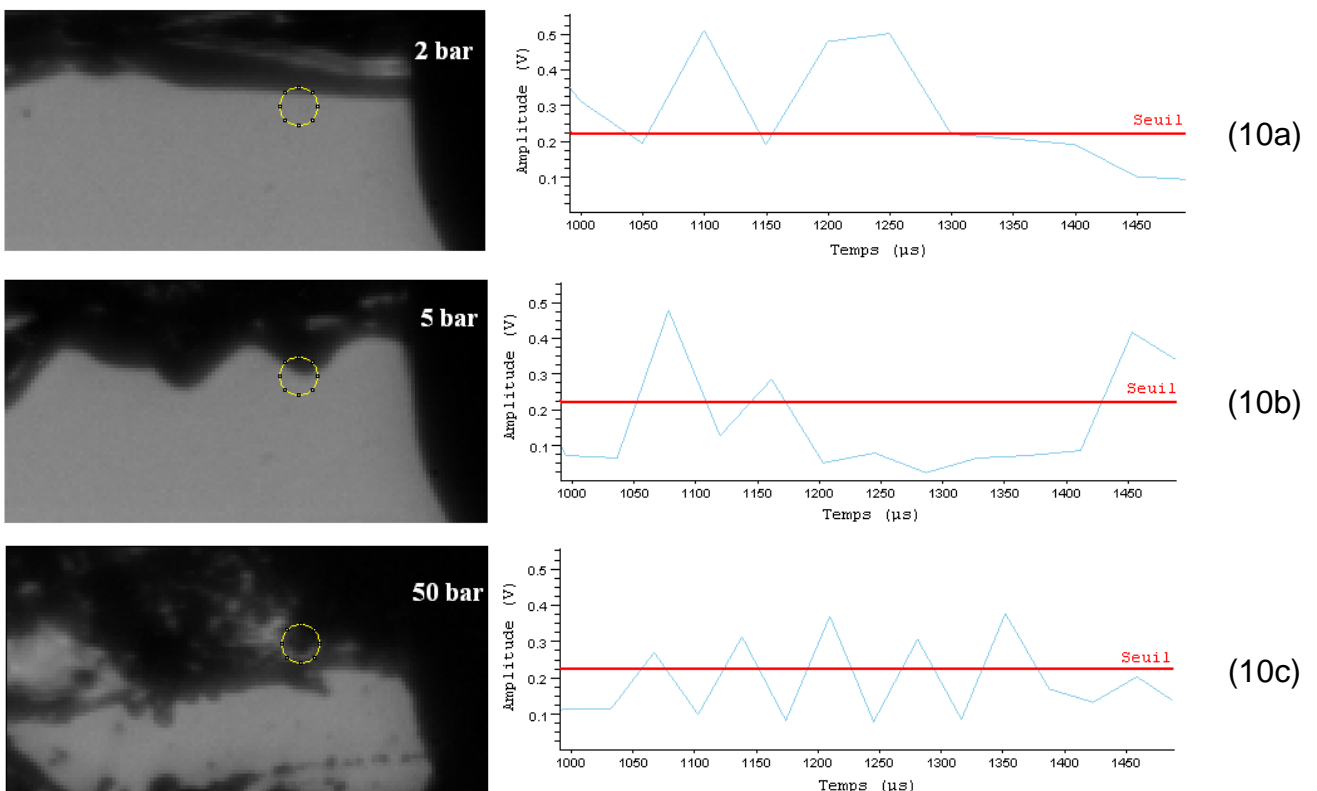


Fig. 10 : Visualisation du spray (à gauche) et du signal VLC enregistré (à droite), pour différentes pressions d'injection

Le pourcentage de points supérieurs au seuil au niveau de la VLC est ici plus élevé à 50 bar, qu'à 2 bar. Les sprays étudiés dans ces deux cas pour ces deux pressions n'ont pas la même morphologie au niveau des volumes de mesure puisque nous avons deux phases bien distinctes à 2 bar, et un spray atomisé à 50 bar. Les augmentations d'amplitudes enregistrées par la technique VLC à 50 bar peuvent découler de plusieurs phénomènes physiques : un trou dans le jet, une nappe liquide de plus faible épaisseur laissant traverser la lumière, ou encore de la diffusion multiple.

## 4. Conclusion

La méthode de la vélocimétrie laser par corrélation s'avère être une méthode robuste, lorsqu'elle est appliquée en proche sortie d'injecteur, là où la vitesse est rapide, et le spray non dispersé. En effet, alors que d'autres techniques de mesures plus courantes ne sont pas applicables, la VLC reste une technique permettant d'extraire des informations sur la vitesse de l'écoulement, quelle que soit la nature des signaux.

La localisation des volumes de mesures sur les images rapides a permis de déterminer la fraction de liquide présent lors de la mesure VLC. La grande fréquence d'acquisition offre la possibilité d'avoir un suivi temporel de l'injection. Le pourcentage de gaz présent dans les volumes de mesure permet de reconstruire un signal similaire au signal VLC enregistré. Ces deux signaux sont comparés, après estimation de la fraction gazeuse dans le volume de mesure du signal VLC.

Les travaux effectués permettent de valider l'hypothèse sur la concordance entre les deux signaux. En effet, le signal reconstruit à partir des images est proportionnel au signal VLC enregistré par les fibres optiques. Comme nous l'avons constaté, une variation des différents paramètres peut très vite faire diverger les résultats. Une amélioration de cette étude par imagerie peut être menée par l'utilisation d'un laser femtoseconde et de portes optiques, visant à isoler les photons balistiques traversant le spray. Une amélioration sur la technique VLC peut être apportée en travaillant sur le bruit perçu par le signal, provenant de diffraction de la lumière, et de diffusion multiple.

## Références :

- Chaves H, Knapp M, Kubitzek A, Obermeier F, « *High speed flow measurements within an injection nozzle* », SPIE vol 2052, pp 265-272 (1993).
- HespeL C, Blaisot J-B, Gazon M, Godard G, « *Laser correlation velocimetry performances in diesel applications: spatial selectivity and velocity sensitivity* ». Exp. In Fluids, DOI: 10.1007/s00348-012-1286-4 (2012).
- Idlahcen S, Méès L, Rozé C, Girasole T, Blaisot J-B, « *Time gate, optical layout, and wavelength effects on ballistic imaging* » JOSA A 26(9):1995-2004 (2009).
- Lacroix T, Blaisot J-B, Rozé C. « *Interprétation de signaux VLC d'un jet haute pression par imagerie femtoseconde* » 14<sup>e</sup> Congrès Français de Visualisation et de Traitement d'Images en Mécanique des Fluides, Congrès FLUVISU/CMOI – Lille (novembre 2011).
- Yon J, Blaisot J-B, Ledoux M, « *Unusual laser-sheet tomography coupled with backlight imaging configurations to study the diesel jet structure at the nozzle outlet for high injection pressures* » J. Flow Vis. Image Process, 9:53-7 (2002).